



Universidad de Valladolid

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS DE
PALENCIA**

Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal

TESIS DOCTORAL:

**CONTROL DE LA EROSIÓN EJERCIDO POR LOS DIQUES
FORESTALES DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-
FORESTAL DE TÓRTOLES (ÁVILA)**

Presentada por Virginia Díaz Gutiérrez
para optar al grado de
doctora por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Joaquín Navarro Hevia
Doctor Ingeniero de Montes

Jorge Mongil Manso
Doctor Ingeniero de Montes

2015

A mi familia



En medio de las numerosas y terribles inundaciones que han tenido lugar durante nueve mil años, porque nueve mil años han pasado desde aquella época, las tierras, que estas revoluciones arrastraban desde las alturas, no se amontonaban en el suelo, como en otros países, sino que, rodando sobre la ribera, iban á perderse en las profundidades del mar. De suerte que, como sucede en las islas poco extensas, nuestro país, comparado con lo que era, se parece á un cuerpo demacrado por la enfermedad; escurriéndose por todas partes la tierra vegetal y fecunda, sólo nos quedó un cuerpo descarnado.

(Platón, Critias, 1872)

Muchas montañas que hoy vemos improductivas lo seguirán siendo por luengos siglos. En cuanto se arrebató la vida a los árboles que las vestían, sus raíces, ya muertas, quedaron sin fuerza para entretejer el suelo con el césped que aprisionaba la lluvia; se agostaron las más humildes hierbecillas y los arbustos, quedó sin defensa la tierra vegetal, y el trueno de la tempestad se confundió con el estrépito de los témpanos del suelo que cedían al empuje de las aguas.

(Lucas Mallada, Los Males de la Patria, 1890)

El hombre de estos campos que incendia los pinares y su despojo aguarda como botín de guerra, antaño hubo raído los negros encinares, talado los robustos robles de la sierra. Hoy ve a sus pobres hijos huyendo de sus lares la tempestad llevarse los limos de la tierra por los sagrados ríos hacia los anchos mares, y en páramos malditos trabaja, sufre y yerra.

(A. Machado, Campos de Castilla, 1907-1917)



AGRADECIMIENTOS

A mis directores Jorge Mongil y Joaquín Navarro que han compartido conmigo sus amplias experiencias; gracias por su tiempo, su paciencia, su dedicación y sus ánimos que me han servido para seguir adelante y no decaer en el intento.

A todos los colaboradores del Grupo de Investigación de Hidrología y Conservación de Aguas y Suelos al que pertenezco: Luis Pedro Martín, Verónica Cruz, Sergio Ajates, Luis Ignacio Resina, Diego Talavera, Mariane Chitolina, Laura Miranda, Víctor Rincón y Óscar Hernández.

A José Antonio Díaz, mi hermano, por las horas y horas de trabajo de campo entre cárcavas y diques.

A mi familia y amigos por los ánimos y el apoyo que me han brindado durante la realización de este trabajo, especialmente en casa. Sin su ayuda no lo habría conseguido.

A Pedro, porque en este proyecto y en la vida, siempre puedo contar contigo.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	29
RESUMEN.....	41
1. INTRODUCCIÓN.....	43
1.1. EL PROBLEMA DE LA EROSIÓN HÍDRICA	44
1.2. LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA ZONA MEDITERRÁNEA.....	48
1.3. FORMAS DE EROSIÓN HÍDRICA: LA EROSIÓN EN CÁRCAVAS	49
1.3.1. CORRECCIÓN Y CONTROL DE CÁRCAVAS	52
1.4. LAS RESTAURACIONES HIDROLÓGICO-FORESTALES CON CONSTRUCCIONES CIVILES.....	56
1.4.1. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL.....	56
1.4.2. OBJETIVOS DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL.....	61
1.4.3. LAS REPOBLACIONES FORESTALES EN LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL	63
1.4.4. LAS OBRAS CIVILES EN LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL.....	65
1.5. LOS DIQUES DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS.....	67
1.5.1. TIPOS DE DIQUES DE RETENCIÓN.....	69
1.5.2. FUNCIONES DE LOS DIQUES DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS	73
1.5.3. EFECTOS DE LOS DIQUES DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS	78
1.5.4. EFECTOS DE LOS SEDIMENTOS SOBRE LA FAUNA PISCÍCOLA	81
1.6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA EROSIÓN RETENIDA POR DIQUES FORESTALES.....	84
1.6.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	85
1.6.2. METODOLOGÍAS PARA LA CUBICACIÓN DE LA CUÑA DE SEDIMENTOS	86
1.7. LA PENDIENTE DE COMPENSACIÓN EN LOS DIQUES FORESTALES.....	89
2. OBJETIVOS.....	97
3. MATERIAL Y MÉTODOS	99
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	99
3.1.1. LOCALIZACIÓN Y SITUACIÓN	99
3.1.2. CLIMA.....	105
3.1.3. GEOLOGÍA, LITOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA	117
3.1.4. EDAFOLOGÍA.....	122



3.1.5. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.....	123
3.1.6. VEGETACIÓN.....	131
3.2. LOS DIQUES DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE TÓRTOLES.....	146
3.3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA CUÑA DE SEDIMENTOS	150
3.3.1. MEDICIONES PREVIAS: LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	150
3.3.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN	156
3.4. COMPARACIÓN DEL RESULTADO OBTENIDO CON OTRAS METODOLOGÍAS	163
3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS.....	166
3.5.1. DENSIDAD APARENTE	166
3.5.2. TEXTURA	167
3.6. ESTIMACIÓN DE LA MASA DE SEDIMENTOS RETENIDOS Y DE LA EROSIÓN	169
3.7. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRAMPA DE LOS DIQUES DE RETENCIÓN (<i>TRAP EFFICIENCY</i>)	169
3.7.1. TRATAMIENTO DEL PARÁMETRO W DE LA TE: CUENCA DE APORTACIÓN	170
3.8. DETERMINACIÓN DE LA TASA DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS Y TASA TOTAL DE SEDIMENTOS.....	173
3.9. DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE ACTUAL DE LA CUÑA DE SEDIMENTOS	175
3.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	176
3.10.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	176
3.10.2. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y REGRESIÓN.....	178
3.10.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS DE LOS DIQUES NO MEDIDOS...	178
3.10.4. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS	179
3.10.5. ANÁLISIS DE LA PENDIENTE ACTUAL	180
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	181
4.1. VOLUMEN DE SEDIMENTOS RETENIDOS.....	181
4.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN CON OTRAS METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS COMPARATIVO	197
4.2.1. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS EN CUANTO A LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN.....	197
4.2.2. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS EN CUANTO AL RENDIMIENTO EN CAMPO207	
4.3. DENSIDAD APARENTE	208



4.4.	GRANULOMETRÍA Y TEXTURA.....	210
4.5.	OTRAS VARIABLES	213
4.6.	MASA DE SEDIMENTOS	215
4.7.	CÁLCULO DE LA EROSIÓN	220
4.7.1.	CÁLCULO EN DIQUES MEDIDOS.....	220
4.7.2.	CÁLCULO EN DIQUES NO MEDIDOS	223
4.7.3.	CÁLCULO DE LA EROSIÓN TOTAL.....	224
4.8.	EFICIENCIA DE TRAMPA	229
4.8.1.	MODELO 1	230
4.8.2.	MODELO 2	234
4.8.3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	238
4.9.	TASA DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS	240
4.10.	TASA TOTAL DE SEDIMENTOS	247
4.11.	PENDIENTE ACTUAL	253
5.	CONCLUSIONES	267
5.1.	VOLUMEN DE SEDIMENTOS RETENIDOS POR LOS DIQUES.....	267
5.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTRAS METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN DEL VOLUMEN	268
5.3.	MASA DE SEDIMENTOS RETENIDOS	269
5.4.	ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN RETENIDA.....	270
5.5.	TASA DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS.....	270
5.6.	TASA TOTAL DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CORNEJA	270
5.7.	CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS.....	271
5.8.	CONCLUSIÓN FINAL	272
6.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	273
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	275
 ANEXOS		
ANEXO I: Inventario de los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles		
297		
A1.1.	METODOLOGÍA	299
A1.2.	RESULTADOS DEL INVENTARIO.....	306



ANEXO II: Datos y resultados de la aplicación de las metodologías de cálculo del volumen de sedimentos.....	337
A2.1. DATOS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	339
A2.2. DATOS Y RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA B.....	543
A2.2. DATOS Y RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA C.....	546
ANEXO III: Estadística ampliada: normalidad de los datos	549
A3.1. ANÁLISIS DE NORMALIDAD.....	551
A3.1.1. VOLUMEN DE SEDIMENTOS.....	551
A3.1.2. MASA DE SEDIMENTOS	556
A3.1.3. TASA DE EROSIÓN	561
A3.1.3. TASA TOTAL DE SEDIMENTOS	566
A3.2. COMPARACIÓN DE MUESTRAS.....	572
A3.2.1. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ Y $\text{Log } V_C$	572
A3.2.2. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA MASA DE SEDIMENTOS TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ Y $\text{Log } SW_C$	576
A3.2.3. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA TASA DE EROSIÓN TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ Y $\text{Log } SY_C$	581
A3.2.4. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA TASA TOTAL DE SEDIMENTOS TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ Y $\text{Log } TSY_C$	585
ANEXO IV: Aportaciones científicas de esta tesis a lo largo de su realización	591
ANEXO V: Relación de símbolos y abreviaturas	679



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa del estado de degradación de los suelos a escala mundial, proyecto GLASOD (UNEP) (GCMD, 2011)	46
Figura 1.2. Mapa de estados erosivos elaborado por el ICONA entre 1987 y 2002 (PAND, 2008)	47
Figura 1.3. A: Trinchos escalonados de guadua (<i>Guadua angustifolia</i>) como disipadores de energía en Palestina (Rivera, 1998). B: Dique de mampostería gavionada en Tórtoles (Ávila). C: Dique de mampostería seca (Pizarro, 2003). D: Dique de mampostería hidráulica (Pizarro, 2003)	56
Figura 1.4. Repoblaciones y obras de corrección efectuadas en España en los años 1940-2010 (modificado de Del Palacio, 2013)	59
Figura 1.5. Zonas prioritarias de actuación definidas en el Plan Nacional de Actuaciones Prioritarias de Restauración Hidrológico-Forestal (MAGRAMA, 2013)	60
Figura 1.6. Esquema de la Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas, según Gil (2004)	62
Figura 1.7. Masa artificial de pino rodeno (<i>Pinus pinaster</i>) que facilita la regeneración de los quejigos en Puebla del Valles, Guadalajara (Del Palacio, 1999)	65
Figura 1.8. Dique de mampostería gavionada en Tórtoles (Ávila).....	71
Figura 1.9. Dique de hormigón en la Sierra de los Filabres (Bellín <i>et al.</i> , 2011)	71
Figura 1.10. Diques de madera en la República Checa (Mongil, 2014a).....	72
Figura 1.11. Dique abierto en el río Forchia (Italia)	72
Figura 1.12. Dique de laminación de caudales líquidos en El Llevant (Mallorca) (Foto: Martínez, A. (MAGRAMA, 2013))	74
Figura 1.13. Presa del Algar (Valencia) diseñada para la recarga del acuífero (www.ohl.es).....	74
Figura 1.14. Dique subsuperficial en Kitui (Kenia) (Foto: TRAGSATEC).....	75
Figura 1.15. Dique de arena durante y después de una tormenta en Kenia (Ersten <i>et al.</i> , 2007)... ..	75
Figura 1.16. Arriba: Construcción empotrada en un dique de gaviones en Tórtoles. Abajo: Vivienda construida al pie de una cárcava en Saldaña.	81
Figura 1.17. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Castillo <i>et al.</i> (2007). S_i =anchura de la cuña en la sección transversal i ; w_s =anchura media de la cuña de sedimentación (calculado como la media de las anchuras de la cuña en la secciones transversales i); w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; w =anchura media del canal relleno de sedimentos; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; l_s =longitud de la cuña de sedimentos	87
Figura 1.18. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Romero <i>et al.</i> (2007a). w_s =ancho de la base del dique en la sección aguas arriba de éste; w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; B =área de la base coincidente con el dique; H =longitud de la cuña de sedimentos.....	88
Figura 1.19. Modificado de Mintegui (1993)	90
Figura 1.20. Cálculo de la pendiente de compensación según García-Nájera (modificado de Sendra (2002))	96
Figura 3.1. Localización del área de estudio	99
Figura 3.2. Vista general del monte, paraje Dos Ríos, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964); abajo en la actualidad	101
Figura 3.3. Vista general de Las Cárcabas, Tórtoles, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964), abajo en la actualidad.	102



Figura 3.4. Vista general de El Arroyuelo, Tórtoles, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964), abajo en la actualidad.	103
Figura 3.5. Vista general de El Cerrón, Tórtoles, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964), abajo en la actualidad	104
Figura 3.6. Temperaturas concurrentes a lo largo del año en la restauración de Tórtoles.....	107
Figura 3.7. Precipitaciones a lo largo del año en la restauración de Tórtoles. <i>P</i> : precipitación mensual media; <i>P_d</i> : precipitación máxima diaria mensual	107
Figura 3.8. Climodiagrama de Walter y Lieth de la restauración de Tórtoles.....	108
Figura 3.9. Representación de los resultados de la ficha hídrica de Thornthwaite & Matter (1957) para la restauración de Tórtoles. <i>ETP</i> = evapotranspiración potencial; <i>ETRMP</i> = evapotranspiración real máxima posible	113
Figura 3.10. Estructura de graben y horst.....	118
Figura 3.11. Mapa geológico del municipio de Tórtoles. Fuente: modificado de IGME (2008)	119
Figura 3.12. Altitud del terreno en el término municipal de Tórtoles	121
Figura 3.13. Mapa de suelos de la zona de estudio, escala 1:62.500 (IGN, 2014).....	123
Figura 3.14. Localización de la cuenca del río Corneja dentro de la cuenca del Duero (arriba) y afluentes del río Corneja (abajo) (a partir de CHD, 2011b, 2011c).....	124
Figura 3.15. Red de drenaje de la zona de estudio (Elaboración propia a partir de IGN (2011))	125
Figura 3.16. Aportación media anual (hm ³) del río Corneja en el tramo de estudio para la serie de años de 1941 a 2005 (CHD, 2011a).....	126
Figura 3.17. Aportación del año medio del río Corneja (hm ³) en el tramo de estudio para la serie de años de 1941 a 2005 (CHD, 2011a)	127
Figura 3.18. Aportación estacional del año medio del río Corneja, en el tramo de estudio para la serie de años de 1941 a 2005 (CHD, 2011a).....	127
Figura 3.19. Localización de las presas y estaciones de calidad cercanas al área de la restauración de Tórtoles (Escala 1:250000) (CHD, 2014a).....	128
Figura 3.20. Vista aérea (izquierda) y planta (derecha) de la presa de Santa Teresa (CHD, 2014b)	129
Figura 3.21. Sólidos en suspensión presentes en las muestras tomadas en la estación de Puente del Congosto con el fin de determinar la calidad de las aguas (CHD, 2014c).....	130
Figura 3.22. Sólidos en suspensión presentes en las muestras tomadas en la estación del embalse de Santa Teresa con el fin de determinar la calidad de las aguas (CHD, 2014c).....	130
Figura 3.23. Series de vegetación del municipio de Tórtoles.....	133
Figura 3.24. Evolución de la cubierta forestal (Mongil <i>et al.</i> , 2013). Arriba: Fotografía aérea de 1945, del Ejército del Aire. Abajo: Fotografía aérea de 2002, del Instituto Geográfico Nacional. . .	139
Figura 3.25. Localización de las repoblaciones de coníferas presentes actualmente en los términos de Tórtoles y Bonilla de la Sierra (que engloba las localidades de Cabezas de Bonilla y Pajarejos). Es probable que la restauración hidrológico-forestal llevada a cabo en los años 60 coincida en su mayoría con las actuales repoblaciones de coníferas localizadas en dichos territorios	140
Figura 3.26. Panorámica de la zona de estudio. Situación previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964).....	141
Figura 3.27. Panorámica de una parte de la zona de estudio. Se observan pies de <i>Cupressus arizonica</i> , de un color más grisáceo, dispersos por todo el monte, entre los diversos pies de pinos que conforman la repoblación. También se observan <i>Prunus avium</i> , de un color rojizo, y	



Populus nigra alrededor de una zona de prado, donde el suelo presenta mejores condiciones para el establecimiento de estas especies.....144

Figura 3.28. Especies más exigentes se encuentran al lado de los diques de las cárcavas, lugar ideal para su asentamiento.....144

Figura 3.29. Cerezo junto a los muros de una huerta, con chopos y sauces145

Figura 3.30. Panorámica de la zona incendiada el 28 de agosto de 2010145

Figura 3.31. Modelos de diques 1 a 7 del proyecto de restauración de Tórtoles (Azcarretazábal, 1964)146

Figura 3.32. Ubicación de los diques inventariados.....149

Figura 3.33. Mediciones a realizar con la estación total, representadas en el perfil longitudinal de la cárcava.....151

Figura 3.34. Representación gráfica de una cuña de sedimentos que no termina en una sección recta151

Figura 3.35. Alzado de las mediciones a realizar con la estación total, en el corte transversal inmediatamente aguas abajo del dique.....152

Figura 3.36. Resultado gráfico de la unión de las mediciones realizadas, obteniendo el lecho donde se asienta la cuña de sedimentos153

Figura 3.37. Disposición de la estación total y de la cinca métrica para comenzar a levantar topográficamente un perfil de la cuña de sedimentos.....154

Figura 3.38. Vista en planta de las mediciones de las secciones transversales a la cuña de sedimentos.....155

Figura 3.39. Vista en tres dimensiones de las mediciones a realizar para determinar la superficie actual de la cuña de sedimentos.....155

Figura 3.40. Cálculo de cotas para la estimación del asiento de la cuña de sedimentos156

Figura 3.41. Estimación del lecho sobre el que se asienta la cuña de sedimentos en aquellos casos en que la cuña se bifurque en dos colas157

Figura 3.42. Ejemplo de ajustes a realizar para cerrar el polígono que conforma la cuña de sedimentos en una sección transversal158

Figura 3.43. Coordenadas relativas del perfil transversal para determinar su área por cálculo matricial (Herráez & Díaz, 2011)159

Figura 3.44. Cálculo de volúmenes entre perfiles mediante la fórmula del prismoide (Herráez & Díaz, 2011).....160

Figura 3.45. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007). S_i =anchura de la cuña en la sección transversal i ; w_s =anchura media de la cuña de sedimentación (calculado como la media de las anchuras de la cuña en la secciones transversales i); w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas abajo de éste; w =anchura media del canal relleno de sedimentos; h =altura de los sedimentos desde la base del dique; l_s =longitud de la cuña de sedimentos.164

Figura 3.46. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Romero (2008). w_s =ancho de la base del dique en la sección aguas arriba de éste; w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas abajo de éste; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; B =área de la base coincidente con el dique; H =longitud de la cuña de sedimentos.165

Figura 3.47. Método del cilindro para medir la densidad aparente del suelo.....166

Figura 3.48. Triángulo textural del USDA (2014b)168

Figura 3.49. Modelo 1 para la determinación de TE (cuencas individuales). En la figura, S_1 , S_2 y S_3 son las superficies de aportación de los diques d_1 , d_2 y d_3 , respectivamente.172



Figura 3.50. Modelo 2 para la determinación de TE (cuenca única). En la figura, W_u es la superficie de aportación del diques ficticio d_u , que engloba las superficies de los tres diques (el ubicado donde el actual dique d_u y los diques d_2 y d_3).	173
Figura 3.51. Relación entre la tasa total de sedimentos (TSY), la tasa de sedimentos retenidos (SY) y la tasa de emisión de sedimentos (SE)	174
Figura 3.52. Pendiente de equilibrio, pendiente modificada y pendiente original de la cuña de sedimentos	176
Figura 3.53: Dique cementado (dique 86)	179
Figura 4.1. Gráfico de cuantiles del volumen de sedimentos (V_A , m^3)	183
Figura 4.2. Gráfico de caja y bigotes para el volumen de sedimentos, determinado con la metodología propuesta (V_A , m^3)	184
Figura 4.3. Histograma de frecuencias del volumen de sedimentos (V_A , m^3)	184
Figura 4.4. Gráfico de caja y bigotes del volumen de sedimentos de una selección de diques (V_A , m^3)	185
Figura 4.5. Relación entre el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , m^3) y las variables indicadas: AU (m): Altura útil de cada dique; AA (m): Altura del aterramiento; AC (m): Ancho de la cuña; LC (m): Longitud de la cuña de sedimentos; LD (m): Longitud del dique; PO (%): Pendiente original; SI (m^2): Superficie individual de la cuenca de aportación; y SV (m^2): Superficie cubierta de vegetación	188
Figura 4.6. Ajuste de regresión entre la superficie de aportación individual (SI , m^2) y el volumen de sedimentos (V_A , m^3)	190
Figura 4.7. Relación entre el número de diques por cárcava (n) y el volumen de sedimentos retenidos por ellos (V , m^3)	197
Figura 4.8. Comparación del volumen medio de la cuña de sedimentos retenida en los diques forestales de Tórtoles por aplicación de las metodologías A, B y C (V_A , V_B y V_C , m^3), e intervalo LSD de Fisher (95,0% de confianza)	201
Figura 4.9. Ajustes de regresión entre la superficie de aportación individual (SI , m^2) y el volumen de sedimentos obtenido por aplicación de las metodologías A, B y C (V_A , V_B y V_C , m^3) ..	206
Figura 4.10. Valores medios del volumen de sedimentos, obtenidos de la aplicación de las distintas metodologías (A, B y C, m^3), y tiempo empleado en aplicarlas (min)	208
Figura 4.11. Gráfico de caja y bigotes de la densidad aparente de los sedimentos de las cuñas (Da , $t \cdot m^{-3}$)	209
Figura 4.12. Histograma de frecuencias de la densidad aparente de los sedimentos (Da , $t \cdot m^{-3}$) ..	210
Figura 4.13. Comparación de la masa de sedimentos retenida de media en los diques forestales de Tórtoles por aplicación de las metodologías A, B y C (SW_A , SW_B y SW_C , t)	218
Figura 4.14. Diferencias entre las masas de sedimentos obtenidas por aplicación de las metodologías A y B (SW_A y SW_B , t) y entre las metodologías A y C (SW_A y SW_C , t), en valor absoluto	219
Figura 4.15. Erosión media e intervalos de confianza para los diques de Tórtoles, obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C de estimación del volumen de sedimentos (SY_A , SY_B y SY_C , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	222
Figura 4.16. Gráfico de dispersión de las tasas de erosión obtenidas por aplicación de las metodologías A, B y C de estimación del volumen (SY_A , SY_B y SY_C , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	223
Figura 4.17. Erosión retenida en los diques de Tórtoles, por intervalos (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	225
Figura 4.18. Fotografías aéreas que muestran la evolución de la cubierta forestal en el área de la restauración. De izquierda a derecha y de arriba abajo se corresponden con los años 1945,	



1957, 1977, 1984, 2002 y 2007. Escala aproximada: 1:10.000. Las fotografías de 1945 y 1957 son del Ejército del Aire; las fotografías de 1977, 1984, 2002 y 2007 son del Instituto Geográfico Nacional.....227

Figura 4.19. Evolución de la superficie cubierta por vegetación forestal (SV) en las cárcavas de Tórtoles a lo largo del tiempo desde 1945(que en los gráficos se corresponde con el año 0) hasta la actualidad. El gráfico de la izquierda representa el porcentaje de vegetación cubierta (en t.p.u.) respecto al área total de la restauración y el de la derecha respecto al área repoblada229

Figura 4.20. Medición y modelado de la recuperación de la vegetación como la relación entre la superficie cubierta por vegetación forestal (SV) y el tiempo transcurrido desde 1945 (que se corresponde con el año 0) en las cárcavas de Tórtoles siguiendo la ecuación de Verhulst-Pearl. En la familia de curvas, el parámetro de eficiencia temporal (λ) varía, de forma que cuanto mayor es el valor λ , más rápida será la respuesta natural. El gráfico de la izquierda representa el porcentaje de vegetación cubierta (en t.p.u.) respecto al área total de la restauración y el de la derecha respecto al área repoblada229

Figura 4.21. Cuencas de aportación de los diques de acuerdo con el modelo 1 de eficiencia de trampa.....232

Figura 4.22. Gráfico de medianas con intervalos del 95,0 % de confianza para la eficiencia de trampa (TE).....234

Figura 4.23. Cuencas de aportación de los diques de acuerdo con el modelo 2 de eficiencia de trampa.....235

Figura 4.24. Eficiencia de trampa obtenida con las metodologías A, B y C de estimación del volumen, para los diques ficticios del modelo 2 de eficiencia de trampa (TE_2 , %).....237

Figura 4.25. Relación entre la eficiencia de trampa (C_T , %) y la capacidad de almacenamiento (S_R , sq mi) (Brune, 1953)238

Figura 4.26. Comparación de las tasas medias de emisión de sedimentos, obtenidas por aplicación de las metodologías A, B y C (SE_A , SE_B y SE_C , t·ha⁻¹·año⁻¹), e intervalo LSD de Fisher (95,0% de confianza).....242

Figura 4.27. Porcentaje de sedimentos retenidos por los diques y % de sedimentos emitidos aguas abajo de la restauración245

Figura 4.28. Concentración natural de sólidos en suspensión (mg·L⁻¹) en el río Tormes en la Presa de Santa Teresa durante 1999-2010 (CHD, 2013), y concentración incrementada que poseería si no existiese la actual red de diques en la cuenca alta del Río Corneja. La línea granate indica la concentración máxima permitida por la Directiva Europea Marco del Agua (DMA) para las aguas de salmónidos (UE, 2000)246

Figura 4.29. Comparación de la tasa total de erosión obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C de estimación del volumen de sedimentos (TSY_A , TSY_B y TSY_C , t·ha⁻¹·año⁻¹), e intervalo LSD de Fisher (95,0% de confianza).....249

Figura 4.30. Gráfico de dispersión de la tasa total de sedimentos entre la tasa obtenida por aplicación de la metodología A de estimación del volumen TSY_A y las tasas obtenidas por aplicación de las metodologías B y C de estimación del volumen (TSY_B y TSY_C , respectivamente). Se muestra el ajuste lineal entre ellas y el coeficiente de regresión obtenido (R^2).250

Figura 4.31. Tasa de sedimentos (SY , t·ha⁻¹·año⁻¹) de los diques de la restauración y tolerancias admisibles establecidas por los diferentes autores.....252

Figura 4.32. Pendientes actuales y originales medidas para el tramo en el que se ubica cada dique de la restauración255

Figura 4.33. Pendiente actual media (PA , %), pendiente original media (PO , %), y reducción media de la pendiente (RP , %)256



Figura 4.34. Ajuste de regresión entre la pendiente actual (PA , %) y la pendiente original (PO , %)	259
Figura A1.1. Ficha de campo para el inventario de diques gavionados (modificado de Martínez de Azagra <i>et al.</i> , 2002)	300
Figura A1.2. Ejemplos de los modelos de diques. De izquierda a derecha y de arriba abajo, modelo 1: dique de mampostería gavionada simple sin vertedero; modelo 2: dique de mampostería gavionada simple con vertedero; modelo 3: dique con vertedero y contrafuertes; modelo 4: dique con vertedero, contrafuertes y dissipador de energía; y modelo 5: otras tipologías de diques (6 fotos)	302
Figura A1.3. Ubicación de los diques inventariados	305
Figura A1.4. Fotos de los diques 1 a 8	307
Figura A1.5. Fotos de los diques 9 a 16	309
Figura A1.6. Fotos diques 17 a 24	311
Figura A1.7. Fotos diques 25 a 32	313
Figura A1.8. Fotos diques 33 a 40	315
Figura A1.9. Fotos diques 41 a 48	317
Figura A1.10. Fotos diques 49 a 56	319
Figura A1.11. Fotos diques 57 a 64	321
Figura A1.12. Fotos diques 65 a 72	323
Figura A1.13. Fotos diques 73 a 80	325
Figura A1.14. Fotos diques 81 a 88	327
Figura A1.15. Fotos diques 89 a 96	329
Figura A1.16. Fotos diques 97 a 105	331
Figura A1.17. Fotos diques 106 a 114	333
Figura A1.18. Fotos diques 115 a 123	335
Figura A2.1. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	340
Figura A2.2. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	340
Figura A2.3. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	340
Figura A2.4. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	340
Figura A2.5. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	341
Figura A2.6. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	341
Figura A2.7. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	341
Figura A2.8. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1	342
Figura A2.9. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	343
Figura A2.10. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	343
Figura A2.11. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	343
Figura A2.12. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	343
Figura A2.13. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	344
Figura A2.14. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	344
Figura A2.15. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	344
Figura A2.16. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	344
Figura A2.17. Sección transversal 9 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2	345
Figura A2.18. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3	346
Figura A2.19. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3	346
Figura A2.20. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3	346
Figura A2.21. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3	346
Figura A2.22. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3	347



Figura A2.23. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3.....	347
Figura A2.24. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3.....	347
Figura A2.25. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	348
Figura A2.26. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	349
Figura A2.27. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	349
Figura A2.28. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	349
Figura A2.29. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	349
Figura A2.30. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	350
Figura A2.31. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	350
Figura A2.32. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....	350
Figura A2.33. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5.....	351
Figura A2.34. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5.....	351
Figura A2.35. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5.....	352
Figura A2.36. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5.....	352
Figura A2.37. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6.....	353
Figura A2.38. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6.....	353
Figura A2.39. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6.....	353
Figura A2.40. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6.....	353
Figura A2.41. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7.....	354
Figura A2.42. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7.....	354
Figura A2.43. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7.....	355
Figura A2.44. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7.....	355
Figura A2.45. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7.....	355
Figura A2.46. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8.....	356
Figura A2.47. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8.....	356
Figura A2.48. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8.....	357
Figura A2.49. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8.....	357
Figura A2.50. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8.....	357
Figura A2.51. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 9.....	358
Figura A2.52. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 9.....	358
Figura A2.53. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 9.....	359
Figura A2.54. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10.....	360
Figura A2.55. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10.....	360
Figura A2.56. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10.....	360
Figura A2.57. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10.....	360
Figura A2.58. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11.....	361
Figura A2.59. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11.....	361
Figura A2.60. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11.....	362
Figura A2.61. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11.....	362
Figura A2.62. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 12.....	363
Figura A2.63. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 12.....	363
Figura A2.64. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 12.....	364
Figura A2.65. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13.....	365
Figura A2.66. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13.....	365
Figura A2.67. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13.....	365
Figura A2.68. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13.....	365
Figura A2.69. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13.....	366



Figura A2.493. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 118	534
Figura A2.494. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 118	535
Figura A2.495. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 119	535
Figura A2.496. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 119	536
Figura A2.497. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 120	536
Figura A2.498. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 120	537
Figura A2.499. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 120	537
Figura A2.500. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121	538
Figura A2.501. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121	538
Figura A2.502. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121	538
Figura A2.503. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121	539
Figura A2.504. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122	540
Figura A2.505. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122	540
Figura A2.506. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122	540
Figura A2.507. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122	541
Figura A2.508. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122	541
Figura A2.509. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123	542
Figura A2.510. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123	542
Figura A2.511. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123	542
Figura A2.512. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123	542
Figura A3.1. Traza de densidad para $\text{Log } V_A$	551
Figura A3.2. Histograma para $\text{Log } V_A$	552
Figura A3.3. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } V_A$	552
Figura A3.4. Traza de densidad para $\text{Log } V_B$	553
Figura A3.5. Histograma para $\text{Log } V_B$	554
Figura A3.6. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } V_B$	554
Figura A3.7. Traza de densidad para $\text{Log } V_C$	555
Figura A3.8. Histograma para $\text{Log } V_C$	555
Figura A3.9. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } V_C$	556
Figura A3.10. Traza de densidad para $\text{Log } SW_A$	556
Figura A3.11. Histograma para $\text{Log } SW_A$	557
Figura A3.12. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SW_A$	557
Figura A3.13. Traza de densidad para $\text{Log } SW_B$	558
Figura A3.14. Histograma para $\text{Log } SW_B$	559
Figura A3.15. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SW_B$	559
Figura A3.16. Traza de densidad para $\text{Log } SW_C$	560
Figura A3.17. Histograma para $\text{Log } SW_C$	560
Figura A3.18. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SW_C$	561
Figura A3.19. Traza de densidad para $\text{Log } SY_A$	562
Figura A3.20. Histograma para $\text{Log } SY_A$	562
Figura A3.21. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SY_A$	563
Figura A3.22. Traza de densidad para $\text{Log } SY_B$	563
Figura A3.23. Histograma para $\text{Log } SY_B$	564
Figura A3.24. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SY_B$	564
Figura A3.25. Traza de densidad para $\text{Log } SY_C$	565
Figura A3.26. Histograma para $\text{Log } SY_C$	566
Figura A3.27. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SY_C$	566



Figura A3.28. Traza de densidad para $\text{Log } TSY_A$	567
Figura A3.29. Histograma para $\text{Log } TSY_A$	567
Figura A3.30. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } TSY_A$	568
Figura A3.31. Traza de densidad para $\text{Log } TSY_B$	569
Figura A3.32. Histograma para $\text{Log } TSY_B$	569
Figura A3.33. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } TSY_B$	570
Figura A3.34. Traza de densidad para $\text{Log } TSY_C$	570
Figura A3.35. Histograma para $\text{Log } TSY_C$	571
Figura A3.36. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } TSY_C$	571
Figura A3.37. Dispersión de las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$	572
Figura A3.38. Gráfico ANOVA de las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$	573
Figura A3.39. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, con intervalos de confianza del 95,0%.....	573
Figura A3.40. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$	574
Figura A3.41. Gráfico de residuos para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$	575
Figura A3.42. Gráfico de medianas para $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, con intervalos del 95,0% de confianza	576
Figura A3.43. Gráfico de cuantiles para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$	576
Figura A3.44. Dispersión de las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$	577
Figura A3.45. Gráfico ANOVA de las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$	577
Figura A3.46. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$, con intervalos de confianza del 95,0%.....	578
Figura A3.47. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$	578
Figura A3.48. Gráfico de residuos para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$	579
Figura A3.49. Gráfico de medianas para $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$, con intervalos del 95,0% de confianza	580
Figura A3.50. Gráfico de cuantiles para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$	580
Figura A3.51. Dispersión de las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$	581
Figura A3.52. Gráfico ANOVA de las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$	581
Figura A3.53. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$, con intervalos de confianza del 95,0%.....	582
Figura A3.54. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$	582
Figura A3.55. Gráfico de residuos para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$	583
Figura A3.56. Gráfico de medianas para $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$, con intervalos del 95,0% de confianza	584
Figura A3.57. Gráfico de cuantiles para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$	585
Figura A3.58. Dispersión de las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$	585
Figura A3.59. Gráfico ANOVA de las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$	586
Figura A3.60. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$, con intervalos de confianza del 95,0%.....	586
Figura A3.61. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$	587
Figura A3.62. Gráfico de residuos para las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$	587
Figura A3.63. Gráfico de medianas para $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$, con intervalos del 95,0% de confianza	588
Figura A3.64. Gráfico de cuantiles para las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$	589



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tasas anuales de erosión en países seleccionados ($t \cdot ha^{-1}$) (Morgan, 1997).....	45
Tabla 1.2. Pérdidas de suelo en los distintos usos del suelo (PAND, 2008).....	47
Tabla 1.3. Actuaciones de restauración hidrológico-forestal llevadas a cabo por la Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA, 2013).....	58
Tabla 1.4. Actuaciones de corrección de una cuenca torrencial (modificado de Del Palacio, 1999)	64
Tabla 1.5. Tipos de obras longitudinales (Del Palacio, 1999).....	66
Tabla 1.6. Tipos de diques de retención permanentes (basado en Conesa, 2004)	69
Tabla 1.7. Resumen de las campañas batimétricas realizadas en una serie de embalses de las cuencas españolas (Conesa & García, 2007a).....	77
Tabla 1.8. Espaciamiento entre diques de acuerdo con la pendiente longitudinal del cauce (Conesa, 2004; en base a Minnesota Pollution Agency, 2000).....	90
Tabla 1.9. Volumen de material necesario para la construcción de dos tipos de diques de gaviones según sus características geométricas (Roshani, 2003).....	91
Tabla 1.10. Valores de los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 , f , C_α de la masa específica ρ_m y de la constante C para los diferentes materiales geológicos (López-Cadenas, 1998).....	93
Tabla 1.11. Ecuaciones planteadas por Vargas (2006) para calcular la pendiente de compensación	96
Tabla 3.1. Características de las estaciones meteorológicas de donde se han tomado los datos de partida para el estudio del clima en la restauración de Tórtoles (www.aemet.es).....	105
Tabla 3.2. Datos climatológicos de partida para el estudio del clima en la restauración de Tórtoles (Fuente: AEMET)	106
Tabla 3.3. Datos climatológicos del año medio de Tórtoles	106
Tabla 3.4. Índices para la clasificación climática de Rivas-Martínez (Elaboración propia a partir de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm)	109
Tabla 3.5. Índices de mediterraneidad: valores límite para la región mediterránea y valores para la restauración de Tórtoles	110
Tabla 3.6. Índices y clasificaciones climáticas y su resultado para el clima de la restauración de Tórtoles	111
Tabla 3.7. Índices climáticos mensuales y las clasificaciones asociadas para el clima de la restauración de Tórtoles	112
Tabla 3.8. Ficha hídrica de Thornthwaite & Matter (1957) para la restauración de Tórtoles ..	112
Tabla 3.9. Parámetros deducibles de la ficha hídrica	113
Tabla 3.10. Precipitación máxima diaria anual (P_d) de la restauración de Tórtoles en el periodo 1966-2013	114
Tabla 3.11. Test de Kolmogorov-Smirnov para la restauración de Tórtoles en el periodo 1966-2013	116
Tabla 3.12. Precipitaciones (P) correspondientes a los distintos periodos de retorno (T) para la restauración de Tórtoles	117
Tabla 3.13. Datos hidrológicos, y datos del embalse de Santa Teresa (CHD, 2014b).....	129
Tabla 3.14. Datos de producción de sedimentos del Embalse de Santa Teresa, obtenidos a partir de análisis batimétricos (modificado de De Vente, 2009)	131
Tabla 3.15. Clasificación biogeográfica de la zona de estudio (Rivas-Martínez, 1987)	132
Tabla 3.16. Etapas de regresión y bioindicadores de las Serie 24 a (Rivas-Martínez, 1987)	133



Tabla 3.17. Evolución histórica de la cubierta forestal de la zona alta y media de la cuenca del río Corneja (Mongil <i>et al.</i> , 2013)	135
Tabla 3.18. Relación de proyectos de restauración (Mongil <i>et al.</i> , 2013).....	140
Tabla 3.19. Principales características de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Mongil <i>et al.</i> , 2013).....	142
Tabla 3.20. Vegetación antes y después de la restauración	143
Tabla 3.21. Dimensiones de los tipos de gaviones proyectados en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Azcarretazábal, 1964).....	149
Tabla 3.22. Distancia entre dos secciones transversales consecutivas, en función de la longitud de la cuña de sedimentos.....	153
Tabla 3.23. Determinación del volumen de la cuña de sedimentos.....	163
Tabla 3.24. Clasificación de partículas en función del diámetro (SSDS, 1993)	168
Tabla 4.1. Volumen de los diques de la restauración obtenido de la aplicación de la metodología propuesta (V_A , m ³)	182
Tabla 4.2. Resumen estadístico del volumen de los diques (V_A , m ³)	183
Tabla 4.3. Percentiles del volumen de los diques (V_A , m ³)	183
Tabla 4.4. Resumen estadístico del volumen de una selección de los diques (V_A , m ³)	185
Tabla 4.5. Estadística descriptiva de las variables utilizadas para el análisis de correlación y regresión del volumen de sedimentos (V_A , m ³)	186
Tabla 4.6. Análisis de correlación entre el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , m ³) y las variables indicadas	187
Tabla 4.7. Análisis de regresión simple para el volumen de sedimentos V_A (m ³).....	189
Tabla 4.8. Análisis de regresión múltiple para el volumen de sedimentos V_A (m ³)	189
Tabla 4.9. Volumen (V_A , m ³) estimado por análisis de regresión simple a partir de la superficie de aportación individual (S_I , m ²) para los diques que no se han podido medir por aplicación directa de la metodología	190
Tabla 4.10. Volumen de sedimentos retenidos por la totalidad de los diques (V_A , m ³). En negrita los casos en los que el volumen se ha estimado por ecuación de regresión a partir de la superficie individual de su cuenca de aportación	192
Tabla 4.11. Resumen de valores medios de volumen de sedimentos (V , m ³) obtenidos por diversos autores	195
Tabla 4.12. Cárcavas, número de diques por cárcava (n) y volumen retenido (V , m ³).....	196
Tabla 4.13. Volumen de los diques de la restauración obtenido de la aplicación de la metodología de Castillo <i>et al.</i> (2007) (V_B , m ³).....	198
Tabla 4.14. Estadística descriptiva del volumen de sedimentos V_B (m ³)	198
Tabla 4.15. Volumen de los diques de la restauración obtenido de la aplicación de la metodología de Romero <i>et al.</i> (2007a) (V_C , m ³).....	199
Tabla 4.16. Estadística descriptiva del volumen de sedimentos V_C (m ³), obtenido de la aplicación de la metodología de Romero <i>et al.</i> (2007a)	200
Tabla 4.17. Tabla ANOVA para el análisis del volumen (V_A).....	201
Tabla 4.18. Prueba de rangos múltiples para el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , V_B y V_C , m ³).....	201
Tabla 4.19. Verificación de varianza (prueba de Levene) para el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , V_B y V_C , m ³).....	202
Tabla 4.20. Prueba de Kruskal-Wallis para el volumen de la cuña (V_A , V_B y V_C , m ³)	202
Tabla 4.21. Diferencias entre los volúmenes obtenidos con la metodología propuesta (V_A , m ³) y los obtenidos por aplicación de las metodologías B y C (V_B y V_C , m ³), en valor real y valor absoluto.....	204



Tabla 4.22. Resumen estadístico de las diferencias entre el volumen de sedimentos obtenido con la metodología propuesta (V_A , m^3) y el obtenido por aplicación de las metodologías B y C (V_B y V_C , m^3).....	206
Tabla 4.23. Tiempo empleado en trabajo de campo y volumen medio de la cuña de sedimentos, obtenidos de la aplicación de las distintas metodologías.....	207
Tabla 4.24. Densidad aparente de las cuñas de los diques (D_a , $t \cdot m^{-3}$).....	208
Tabla 4.25. Estadística descriptiva de la densidad aparente de las cuñas de los diques de la restauración de Tórtoles (D_a , $t \cdot m^{-3}$).....	209
Tabla 4.26. Granulometría y texturas de los sedimentos de las cuñas.....	211
Tabla 4.27. Valores de las variables accesorias para los diques de la restauración de Tórtoles.....	214
Tabla 4.28. Estadística descriptiva de las variables accesorias.....	215
Tabla 4.29. Masa de los sedimentos retenidos (t), de acuerdo con la metodología propuesta (SW_A), con la metodología de Castillo <i>et al.</i> (2007) (SW_B) y con la metodología de Romero <i>et al.</i> (2007a) (SW_C).....	216
Tabla 4.30. Estadística descriptiva de la masa de sedimentos (t), obtenida de la aplicación de la metodología propuesta (SW_A), de la metodología de Castillo <i>et al.</i> (2007) (SW_B) y de la metodología de Romero <i>et al.</i> (2007a) (SW_C).....	217
Tabla 4.31. Prueba de Kruskal-Wallis para la masa de sedimentos obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C (SW_A , SW_B y SW_C , t).....	218
Tabla 4.32. Prueba de Levene para la masa de sedimentos obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C (SW_A , SW_B y SW_C , t).....	219
Tabla 4.33. Diferencias medias entre las masas de sedimentos (SW , t) obtenidas por aplicación de las metodologías A y B (SW_A y SW_B) y entre las metodologías A y C (SW_A y SW_C), en valor absoluto y por agrupación de los datos.....	220
Tabla 4.34. Tasa de erosión de los diques de la restauración de Tórtoles ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) de acuerdo con la metodología propuesta (SY_A), con las metodologías propuestas por Castillo <i>et al.</i> (2007) (SY_B) y por Romero <i>et al.</i> (2007a) (SY_C).....	221
Tabla 4.35. Estadística descriptiva de la tasa de erosión retenida por los diques de Tórtoles ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), obtenida de la aplicación de la metodología propuesta (SY_A), de la metodología propuesta por Castillo <i>et al.</i> (2007) (SY_B) y de la metodología propuesta por Romero <i>et al.</i> (2007a) (SY_C).....	222
Tabla 4.36. Tabla ANOVA para el análisis de la tasa de erosión retenida (SY).....	222
Tabla 4.37. Prueba de Levene para el análisis de la tasa de erosión retenida (SY).....	223
Tabla 4.38. Volumen estimado de la cuña de sedimentos (V , m^3), densidad aparente (D_a , $t \cdot m^{-3}$), peso de los sedimentos (SW , t), superficie individual de la cuenca de aportación (SI , m^3) y tasa de sedimentos (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) de los diques que no se han podido medir por aplicación de la metodología propuesta.....	224
Tabla 4.39. Estadística descriptiva de la erosión total retenida por los diques (SY_T , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).....	224
Tabla 4.40. Categorías para considerar distintos grados de erosión, expresadas en $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ y en $mm \cdot año^{-1}$ (FAO, 1979).....	225
Tabla 4.41. Superficie cubierta por vegetación forestal (SV , m^2) y porcentaje de la superficie cubierta con respecto al área total de la repoblación (SV , %) a lo largo del tiempo.....	228
Tabla 4.42. Superficie cubierta por vegetación forestal (m^2) a lo largo del tiempo y porcentaje de vegetación forestal cubierta para cada año con respecto al área total de la restauración (izquierda) y con respecto al área repoblada (derecha).....	228



Tabla 4.43. Eficiencia de trampa de los diques (%) de acuerdo con el modelo 1 y por aplicación de las metodologías A (TE_{A1}), B (TE_{B1}) y C (TE_{C1}), en %	231
Tabla 4.44. Estadística descriptiva de la eficiencia de trampa de los diques (%), de acuerdo con el modelo 1 y obtenida de la aplicación de la metodología propuesta (TE_{A1}), de la metodología de Castillo <i>et al.</i> (2007) (TE_{B1}) y de la metodología de Romero <i>et al.</i> (2007a) (TE_{C1}).....	233
Tabla 4.45. Tabla ANOVA para el análisis de la eficiencia de trampa (TE).....	233
Tabla 4.46. Prueba de Levene para el análisis de la eficiencia de trampa (TE).....	233
Tabla 4.47. Prueba de Kruskal-Wallis para el análisis de la eficiencia de trampa (TE)	233
Tabla 4.48. Superficie de aportación (SF , m^2) y eficiencia de trampa (TE , %) de los diques ficticios del modelo 2, obtenida por aplicación de las metodologías de estimación del volumen A, B y C (TE_{A2} , TE_{B2} y TE_{C2} , respectivamente, en %)	236
Tabla 4.49. Estadística descriptiva de la superficie de aportación SF (m^2) y eficiencia de trampa (TE , %) de los diques ficticios del modelo 2, obtenida de la aplicación de las metodologías de estimación del volumen A, B y C (TE_{A2} , TE_{B2} y TE_{C2} , respectivamente, en %).....	336
Tabla 4.50. Prueba de Kruskal-Wallis para el análisis de la eficiencia de trampa del modelo 2 (TE_2 , %)	337
Tabla 4.51. Prueba de Levene para el análisis de la eficiencia de trampa del modelo 2 (TE_2 , %)....	238
Tabla 4.52. Tasa de emisión de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) de acuerdo con la metodología propuesta (SE_A), con la metodología B (SE_B) y con la metodología C (SE_C).....	241
Tabla 4.53. Estadística descriptiva de las tasas de emisión de sedimentos SE_A , SE_B y SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	242
Tabla 4.54. Tabla ANOVA para el análisis de la tasa de emisión de sedimentos (SE , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	242
Tabla 4.55. Prueba de rangos múltiples de la tasa de emisión de sedimentos (SE , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)....	242
Tabla 4.56. Prueba de Levene para el análisis de la tasa de emisión de sedimentos (SE , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	243
Tabla 4.57. Prueba de Kruskal-Wallis para la tasa de emisión de sedimentos (SE , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).....	243
Tabla 4.58. Tasa total de sedimentos para cada dique de la restauración: TSY_A , TSY_B y TSY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	247
Tabla 4.59. Estadística descriptiva de la tasa total de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), obtenida de la aplicación de las distintas metodologías de estimación del volumen: TSY_A , TSY_B TSY_C	248
Tabla 4.60. Tabla ANOVA para el análisis de la tasa total de sedimentos (TSY)	248
Tabla 4.61. Prueba de Levene para el análisis de la tasa total de sedimentos (TSY).....	249
Tabla 4.62. Revisión de las tasas medias de erosión (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) obtenidas en diversos estudios realizados en la Península Ibérica (modificado y ampliado de Bellín <i>et al.</i> , 2011).....	253
Tabla 4.63. Análisis de correlación entre la superficie de aportación individual (SI , m^2) y la tasa de erosión (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) con los datos agrupados	253
Tabla 4.64. Pendiente original (PO), pendiente actual (PA) y reducción de la pendiente de las cárcavas (RP), medidos en %, e indicación de si se trata de aterramiento total (AT) o parcial (AP) del dique	254
Tabla 4.65. Estadística descriptiva de la pendiente original (PO , %), de la pendiente actual (PA , %), y de la reducción de pendiente (RP , %) ocasionada por la cuña de sedimentos de cada dique.....	256
Tabla 4.66. Pendientes original y conseguida tras el establecimiento de diques de retención en los arroyos de la región de Calabria (Porto & Gessler, 1999)	257



Tabla 4.67. Reducción de la pendiente (RP, %) por grupos, en función de la pendiente original (PO, %).....257

Tabla 4.68. Análisis de correlación entre la pendiente actual y las variables: pendiente original (PO), altura del aterramiento (AA) y longitud de la cuña (LC)258

Tabla 4.69. Análisis del modelo de regresión múltiple para la pendiente actual de la cuña de sedimentos.....260

Tabla 4.70. Matriz de correlación para las estimaciones de los coeficientes del modelo de regresión para la pendiente de la cuña de sedimentos (%).....261

Tabla 4.71. Estudio de los análisis de correlación para la pendiente de la cuña de sedimentos (%), diferenciando entre diques aterrados y no aterrados.....262

Tabla 4.72. Relaciones entre la pendiente original y la pendiente de compensación, recogidas por Vargas (2006) para las diferentes experiencias262

Tabla 4.73. Superficies estables conseguidas gracias a la cuña de sedimentos ($S_{cuña}$, m²) y pendiente de cada cuña ($P_{cuña}$, %).....264

Tabla 4.74. Superficie estable conseguida gracias a la cuña de sedimentación formada, para cada intervalo de pendiente265

Tabla A1.1. Resultados del inventario para los diques 1 a 8.....306

Tabla A1.2. Resultados del inventario para los diques 9 a 16.....308

Tabla A1.3. Resultados del inventario para los diques 17 a 24.....310

Tabla A1.4. Resultados del inventario para los diques 25 a 32.....312

Tabla A1.5. Resultados del inventario para los diques 33 a 40.....314

Tabla A1.6. Resultados del inventario para los diques 41 a 48.....316

Tabla A1.7. Resultados del inventario para los diques 49 a 56.....318

Tabla A1.8. Resultados del inventario para los diques 57 a 64.....320

Tabla A1.9. Resultados del inventario para los diques 65 a 72.....322

Tabla A1.10. Resultados del inventario para los diques 73 a 80.....324

Tabla A1.11. Resultados del inventario para los diques 81 a 88.....326

Tabla A1.12. Resultados del inventario para los diques 89 a 96.....328

Tabla A1.13. Resultados del inventario para los diques 97 a 105.....330

Tabla A1.14. Resultados del inventario para los diques 106 a 114.....333

Tabla A1.15. Resultados del inventario para los diques 115 a 123.....334

Tabla A2.1. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 1.....339

Tabla A2.2. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 2.....342

Tabla A2.3. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 3.....345

Tabla A2.4. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 4.....348

Tabla A2.5. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 5.....351

Tabla A2.6. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 6.....352

Tabla A2.7. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 7.....354

Tabla A2.8. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 8.....356



Tabla A2.9. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 9	358
Tabla A2.10. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 10	359
Tabla A2.11. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 11	361
Tabla A2.12. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 12	363
Tabla A2.13. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 13	364
Tabla A2.14. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 14	366
Tabla A2.15. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 15	368
Tabla A2.16. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 16	370
Tabla A2.17. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 17	373
Tabla A2.18. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 18	376
Tabla A2.19. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 19	378
Tabla A2.20. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 20	380
Tabla A2.21. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 21	382
Tabla A2.22. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 22	383
Tabla A2.23. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 23	385
Tabla A2.24. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 24	387
Tabla A2.25. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 25	389
Tabla A2.26. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 27	391
Tabla A2.27. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 28	392
Tabla A2.28. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 29	394
Tabla A2.29. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 30	396
Tabla A2.30. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 32	397
Tabla A2.31. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 33	399
Tabla A2.32. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 34	401



Tabla A2.33. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 35.....	402
Tabla A2.34. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 36.....	404
Tabla A2.35. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 37.....	406
Tabla A2.36. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 38.....	408
Tabla A2.37. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 39.....	409
Tabla A2.38. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 40.....	410
Tabla A2.39. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 41.....	412
Tabla A2.40. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 42.....	413
Tabla A2.41. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 43.....	414
Tabla A2.42. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 44.....	416
Tabla A2.43. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 45.....	418
Tabla A2.44. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 46.....	419
Tabla A2.45. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 47.....	421
Tabla A2.46. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 48.....	422
Tabla A2.47. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 49.....	424
Tabla A2.48. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 50.....	425
Tabla A2.49. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 51.....	426
Tabla A2.50. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 52.....	428
Tabla A2.51. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 54.....	429
Tabla A2.52. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 55.....	430
Tabla A2.53. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 56.....	432
Tabla A2.54. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 57.....	433
Tabla A2.55. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 59.....	435
Tabla A2.56. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 61.....	436



Tabla A2.57. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 62.....	438
Tabla A2.58. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 63.....	442
Tabla A2.59. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 64.....	445
Tabla A2.60. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 65.....	448
Tabla A2.61. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 66.....	449
Tabla A2.62. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 67.....	450
Tabla A2.63. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 68.....	452
Tabla A2.64. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 69.....	454
Tabla A2.65. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 70.....	456
Tabla A2.66. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 71.....	457
Tabla A2.67. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 72.....	459
Tabla A2.68. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 74.....	461
Tabla A2.69. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 75.....	462
Tabla A2.70. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 76.....	463
Tabla A2.71. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 78.....	464
Tabla A2.72. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 79.....	466
Tabla A2.73. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 80.....	468
Tabla A2.74. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 81.....	470
Tabla A2.75. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 82.....	472
Tabla A2.76. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 83.....	473
Tabla A2.77. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 84.....	475
Tabla A2.78. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 85.....	476
Tabla A2.79. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 87.....	477
Tabla A2.80. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 88.....	478



Tabla A2.81. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 89.....	480
Tabla A2.82. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 90.....	481
Tabla A2.83. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 91.....	483
Tabla A2.84. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 92.....	484
Tabla A2.85. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 93.....	486
Tabla A2.86. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 94.....	487
Tabla A2.87. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 95.....	488
Tabla A2.88. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 96.....	490
Tabla A2.89. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 97.....	492
Tabla A2.90. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 98.....	493
Tabla A2.91. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 99.....	496
Tabla A2.92. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 100.....	498
Tabla A2.93. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 102.....	500
Tabla A2.94. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 103.....	503
Tabla A2.95. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 104.....	507
Tabla A2.96. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 105.....	509
Tabla A2.97. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 106.....	512
Tabla A2.98. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 107.....	514
Tabla A2.99. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 108.....	515
Tabla A2.100. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 109.....	517
Tabla A2.101. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 110.....	519
Tabla A2.102. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 111.....	521
Tabla A2.103. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 112.....	522
Tabla A2.104. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 113.....	524



Tabla A2.105. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 114	527
Tabla A2.106. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 116	530
Tabla A2.107. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 117	531
Tabla A2.108. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 118	533
Tabla A2.109. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 119	535
Tabla A2.110. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 120	536
Tabla A2.111. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 121	537
Tabla A2.112. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 122	539
Tabla A2.113. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 123	541
Tabla A2.114. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Castillo <i>et al.</i> (2007) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración.....	543
Tabla A2.115. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Romero <i>et al.</i> (2007a) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración	548
Tabla A3.1. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } V_A$	551
Tabla A3.2. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } V_A$	552
Tabla A3.3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } V_A$	552
Tabla A3.4. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } V_B$	553
Tabla A3.5. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } V_B$	553
Tabla A3.6. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } V_B$	554
Tabla A3.7. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } V_C$	554
Tabla A3.8. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } V_C$	555
Tabla A3.9. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } V_C$	555
Tabla A3.10. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SW_A$	556
Tabla A3.11. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SW_A$	557
Tabla A3.12. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SW_A$	557
Tabla A3.13. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SW_B$	558
Tabla A3.14. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SW_B$	558
Tabla A3.15. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SW_B$	559
Tabla A3.16. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SW_C$	559
Tabla A3.17. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SW_C$	560
Tabla A3.18. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SW_C$	561
Tabla A3.19. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SY_A$	561
Tabla A3.20. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SY_A$	562
Tabla A3.21. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SY_A$	562
Tabla A3.22. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SY_B$	563
Tabla A3.23. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SY_B$	564
Tabla A3.24. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SY_B$	564
Tabla A3.25. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SY_C$	565



Tabla A3.26. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SY_C$ 565

Tabla A3.27. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SY_C$ 566

Tabla A3.28. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } TSY_A$ 567

Tabla A3.29. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } TSY_A$ 567

Tabla A3.30. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } TSY_A$ 568

Tabla A3.31. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } TSY_B$ 568

Tabla A3.32. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } TSY_B$ 569

Tabla A3.33. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } TSY_B$ 569

Tabla A3.34. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } TSY_C$570

Tabla A3.35. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } TSY_C$571

Tabla A3.36. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } TSY_C$ 571

Tabla A3.37. Resumen estadístico de las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$572

Tabla A3.38. Tabla ANOVA para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$573

Tabla A3.39. Tabla de Medias para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, con intervalos de confianza del 95,0%573

Tabla A3.40. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$574

Tabla A3.41. Prueba de Levene para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$575

Tabla A3.42. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$575

Tabla A3.43. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$ 576

Tabla A3.44. Resumen estadístico de las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$ 577

Tabla A3.45. Tabla ANOVA para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$577

Tabla A3.46. Tabla de Medias para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$, con intervalos de confianza del 95,0%578

Tabla A3.47. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$579

Tabla A3.48. Prueba de Levene para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$579

Tabla A3.49. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$ 580

Tabla A3.50. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$ 580

Tabla A3.51. Resumen estadístico de las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$ 581

Tabla A3.52. Tabla ANOVA para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$582

Tabla A3.53. Tabla de Medias para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$, con intervalos de confianza del 95,0%582

Tabla A3.54. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$ 583

Tabla A3.55. Prueba de Levene para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$ 583

Tabla A3.56. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$ 584

Tabla A3.57. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras $\text{Log } SY_A$, $\text{Log } SY_B$ y $\text{Log } SY_C$...584

Tabla A3.58. Resumen estadístico de las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$ 585

Tabla A3.59. Tabla ANOVA para las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$586

Tabla A3.60. Tabla de Medias para las muestras $\text{Log } TSY_A$, $\text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } TSY_C$, con intervalos de confianza del 95,0%586

Tabla A3.61. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $\text{Log } \text{Log } TSY_A$, $\text{Log } \text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } \text{Log } TSY_C$ 587

Tabla A3.62. Prueba de Levene para las muestras $\text{Log } \text{Log } TSY_A$, $\text{Log } \text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } \text{Log } TSY_C$588

Tabla A3.63. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras $\text{Log } \text{Log } TSY_A$, $\text{Log } \text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } \text{Log } TSY_C$ 588

Tabla A3.64. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras $\text{Log } \text{Log } TSY_A$, $\text{Log } \text{Log } TSY_B$ y $\text{Log } \text{Log } TSY_C$589



RESUMEN

La erosión en cárcavas es un problema con graves consecuencias en términos de pérdida del recurso suelo sobre el que se sustenta la vida. Entre las técnicas de corrección de cárcavas se encuentran los diques de retención. La efectividad de estas estructuras empleadas en los proyectos de restauración hidrológico-forestal es motivo de controversia en los últimos años. De aquí deriva la importancia de realizar una medición de detalle de la cuña de sedimentos retenidos a partir de la cual se pueden obtener tasas de erosión y de emisión de sedimentos aguas abajo de los diques que permiten estimar con exactitud las implicaciones en los cursos de agua que reciben estas partículas.

El objetivo de este trabajo es estudiar la eficacia de los diques forestales en la retención de sedimentos a partir del estudio de los diques construidos en las cárcavas y barrancos de Tórtoles (cuenca del río Corneja), en la década de los 60, mediante la aplicación de una nueva metodología que mide con exactitud la cuña de sedimentos retenida.

En este estudio se ha realizado la medición del volumen de sedimentos capturado por los diques de la restauración realizando un trabajo topográfico de detalle con una estación total de precisión de ± 1 cm, que consiste en mediciones de las secciones transversales de la cuña de sedimentos y posterior cálculo matricial. La metodología que aquí se plantea se ha comparado con otras metodologías existentes con base en sencillos elementos geométricos (prismas y pirámides de base trapezoidal). La caracterización de los sedimentos, la determinación de la eficiencia de trampa de estas estructuras y la medición de las superficies de aportación de sedimentos a cada dique se han empleado para estimar las tasas de retención, emisión y total de erosión y para analizar las consecuencias de la tasa total de emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración. Además, el análisis de la pendiente de compensación ha permitido estudiar las implicaciones geomorfológicas de estas estructuras.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los 123 diques de Tórtoles han retenido un total de $6.194,95 \text{ m}^3$ a lo largo de 48 años, lo que supone una media de $50,37 \text{ m}^3$ por dique. Estos valores son superiores a los obtenidos aplicando otras metodologías con un trabajo de campo menos detallado y de menor tiempo de aplicación. La tasa de erosión de la zona de estudio asciende a $5,56 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de acuerdo con la metodología propuesta (un 18,44% y un 12,60% mayor que por aplicación de las otras metodologías). Gracias a la medición de la eficiencia de trampa (*trap efficiency*), que toma un valor medio del 92,12%, se ha estimado la emisión de sedimentos en una media de $0,096 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, observando diferencias significativas con respecto a las tasas obtenidas por aplicación de las metodologías comparadas. Si los sedimentos que han quedado retenidos se hubieran emitido aguas abajo de la restauración podrían haberse visto afectadas las aguas trucheras del río Corneja, que actualmente poseen niveles adecuados de sólidos en suspensión (se precisan valores inferiores a $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de sólidos en suspensión para la supervivencia de especies de salmónidos), así como el embalse de Santa Teresa. Las tasas totales de erosión de la zona de estudio, en su



tratamiento dique a dique gracias a la información recogida en campo, superan las tasas tolerables en el 64,60% de los casos. Es por ello que las pérdidas de suelo en la zona de estudio no son admisibles, aunque gracias a la eficacia de los diques, la emisión de partículas sea muy reducida. Además, la formación de una cuña de sedimentos supone una reducción de la pendiente de las cárcavas en las que se ubican (11,29% de reducción media) y la formación de una superficie de 2.787,68 m² aptos para el cultivo y de 5.150,30 m² aptos para el establecimiento de pastizales.

Se puede concluir que gracias a la metodología propuesta para la medición de los sedimentos retenidos en los diques, que conlleva mediciones detalladas en campo, se obtienen unas tasas de erosión muy precisas que permiten una mejor comprensión del funcionamiento de estas estructuras, de su efectividad en el control de la erosión y de los cambios geomorfológicos generados. Gracias a su aplicación se ha comprobado que los diques de la restauración de Tórtoles han desarrollado un papel muy positivo en el control y retención de sedimentos, produciendo además beneficiosos cambios geomorfológicos gracias a la reducción de pendiente que provocan, que consigue una estabilización de las laderas vertientes y la formación de una superficie útil para su plantación que se había perdido debido a la formación de cárcavas y barrancos.



1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es un problema grave en España, especialmente en la vertiente mediterránea debido principalmente a su clima, con épocas de sequía interrumpidas por fuertes tormentas, a las grandes pendientes y a la falta de vegetación. En estas condiciones, la generación de cárcavas es frecuente. Las cárcavas, malas tierras o *badlands* son una de las formas de erosión más graves y más complicadas de corregir. La fórmula comúnmente empleada para su corrección es la combinación de vegetación y diques (*check dams*) a través de los programas y trabajos de restauración hidrológico-forestal. Para evaluar la eficacia de estas restauraciones es necesario conocer el papel que desempeñan los diques, estructuras que se construyen transversalmente al cauce con la intención de retener los sedimentos erosionados. Por lo tanto, para conocer la efectividad de los diques se precisa conocer el volumen de sedimento que retienen. Existen varias metodologías que permiten conocer este volumen, pero a vista de los resultados parecen demasiado simples para conocer con precisión el papel de los diques, por lo que resulta necesario disponer de una metodología de detalle que se ajuste a todas las situaciones y morfologías de cuñas de sedimentación y que permitan estimar de forma más certera la labor de estas estructuras. A partir de un conocimiento detallado del volumen de sedimentos retenidos por los diques es posible obtener tasas fiables de erosión, tanto en cuanto a la producción de sedimentos como en cuanto a su emisión, lo cual nos permite conocer la influencia de estas actuaciones aguas abajo de la restauración, especialmente sobre el aterramiento de embalses ubicados aguas abajo de la restauración y sobre la fauna piscícola que puede estar gravemente afectada por la presencia de sedimentos en los cursos de agua en los que vive.

Por último, uno de los efectos de los diques y de su cuña de sedimentos es generar una pendiente de compensación o de equilibrio, que es importante conocer. La longitud de esta pendiente determina el número de diques y a qué distancia deben ser construidos en los proyectos de restauración. Existen múltiples fórmulas y métodos teóricos para su determinación, tal y como se expondrá a continuación, pero en caso de restauraciones llevadas a cabo hace años, en las que se conoce el emplazamiento de estas estructuras, resulta interesante estudiar las pendientes de sus cuñas de sedimentos y su longitud e intentar obtener una fórmula o criterio para establecer dicha pendiente y longitud en obras futuras y, así, emplazar adecuadamente los diques que se deseen proyectar. Asimismo, es importante conocer los cambios geomorfológicos que ha sufrido la zona sometida a un proyecto de restauración y los efectos que estos cambios tienen en la dinámica de sedimentos aguas abajo de la restauración por su influencia sobre la fauna piscícola y la colmatación de embalses. Entre los efectos geomorfológicos se encuentra la reducción de pendiente que provocan aguas arriba de las estructuras de retención, de forma que se consigue una superficie estable sobre la que pueden asentarse cultivos y pastizales.



1.1. EL PROBLEMA DE LA EROSIÓN HÍDRICA

La erosión del suelo por acción del agua y del viento es un problema constante desde que la humanidad comenzó a cultivar la tierra, que causa la pérdida y redistribución del suelo, la degradación de su estructura, el arrastre de materia orgánica y nutrientes, y, como consecuencia, un descenso de su fertilidad y una pérdida de productividad de las tierras afectadas (Morgan, 1997).

La erosión es un proceso que consiste en la pérdida de la capa superficial del suelo, debido al transporte de las partículas que forman parte de su masa, de un punto a otro. Ellison (1947), establece una división del proceso de erosión en tres fases o etapas, indicando además que los diferentes suelos reaccionan de manera distinta en cada una de ellas (Hudson, 1982). De esta forma, cuando un suelo se erosiona, en primer lugar, las partículas constituyentes del suelo se segregan y desprenden; posteriormente éstas son transportadas por el agua (erosión hídrica) o por el viento (erosión eólica), hasta el momento en que estos agentes erosivos pierden la energía necesaria para el transporte, produciéndose, finalmente, su deposición.

La pérdida de suelo lleva asociada una pérdida de nutrientes y de materia orgánica, y consecuentemente una reducción de su fertilidad (Romero *et al.*, 2012). Al disminuir la capa de suelo se reduce el espacio en el que las raíces pueden crecer, y a su vez las disponibilidades hídricas y de nutrientes del suelo se agotan más rápidamente, produciendo una bajada de la productividad de los suelos erosionados, debida asimismo a la degradación de la estructura del suelo, a la reducción de su profundidad, a la disminución en el contenido de materia orgánica y a la pérdida de nutrientes (Bertoni & Lombardi, 1985; Romero *et al.*, 2012).

Los factores naturales generan una erosión de evolución muy lenta, si bien la erosión también puede tener un origen antrópico, denominada comúnmente como erosión acelerada, que tiene su origen en las siguientes acciones señaladas por Porta *et al.* (2003) e Ibáñez *et al.* (2003):

- Deforestación
- Roturación del terreno
- Incendios forestales
- Laboreo
- Sobrepastoreo
- Mal uso o quema de restos de cosechas
- Explotación insostenible de los recursos hídricos
- Concentración de la actividad económica en zonas costeras (la litorización)
- Algunas actividades deportivas
- Vías de comunicación y su entorno
- Edificaciones y su entorno

La carta mundial de los suelos (FAO, 1981) pone de relieve la importancia del suelo como un componente esencial del medio ambiente sobre el que se desarrolla la vida,



cuyo uso no debe causar su degradación, ya que las consecuencias en términos de pérdida de suelo serían irreparables.

Para ofrecer una idea de la magnitud del problema, la erosión y la desertificación ponen en peligro la salud y los medios de vida de más de 1.000 millones de personas, y en términos monetarios, según la ONU, causan unas pérdidas anuales en la producción agrícola de 42.000 millones de dólares (Alfonso, 2005).

Morgan (1997) ofrece unos intervalos de tasas anuales de erosión en una serie de países, de donde se deducen unos mayores valores en tierras cultivadas, con respecto a un suelo con vegetación natural, si bien mayores valores se observan en suelos desnudos (Tabla 1.1). Este dato pone de manifiesto la necesidad de preservar los suelos en su estado natural, y de restaurar los suelos que se encuentren desprotegidos. En este sentido, Lal & Stewart (1995) estiman que el 80% de las tierras agrícolas del mundo sufren erosión moderada a severa, y el 10% de éstas, erosión ligera a moderada.

Tabla 1.1. Tasas anuales de erosión en países seleccionados ($t \cdot ha^{-1}$) (Morgan, 1997)

	NATURAL	CULTIVADO	DESNUDO
AUSTRALIA	0,0 - 64	0,1 - 150	44 - 87
BÉLGICA	0,1 - 0,5	3 - 30	7 - 82
CHINA	0,1 - 2	150 - 200	280 - 360
COSTA DE MARFIL	0,03 - 0,2	0,1 - 90	10 - 750
ETIOPÍA	1 - 5	8 - 42	5 - 70
INDIA	0,5 - 5	0,3 - 40	10 - 185
NIGERIA	0,5 - 1	0,1 - 35	3 - 150
UK	0,1 - 0,5	0,1 - 20	10 - 200
USA	0,03 - 3	5 - 170	4 - 9

Por otra parte, el proyecto internacional “Global Assessment of Human Induced Soil Degradation (GLASOD)” elaborado en 1990 por el programa “United Nations Environment Programme (UNEP)” señala el alto grado de degradación que presentan los suelos de todo el mundo (Figura 1.1). En España se observa un estado de degradación de los suelos que varía de un valor medio a muy alto, según la zona. En una versión más extensa del mapa se observa que esta degradación está producida principalmente por erosión hídrica, con valores que varían de moderado a elevado (GCMD, 2011). De hecho, la erosión es uno de los procesos más importantes que causan estos valores de degradación del suelo en la región mediterránea (Ibáñez *et al.*, 2003).

La erosión es un problema ambiental grave en España, de forma que en varias ocasiones ha sido calificado por las Naciones Unidas como el país europeo con mayor riesgo de desertificación por erosión (Rubio, 2005), con un 18% del territorio con riesgo desertificación alto o muy alto (Rojo *et al.*, 2009). Prueba de ello son los amplios fondos que destina la Administración Española en trabajos de control de la erosión y

del transporte de sedimentos, y los diversos programas y proyectos españoles, como el LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo) o el plan nacional de I+D, e incluso de la Unión Europea, como CORINE (Soil Erosion Risk and Important Land Resources), MEDALUS (Usos del Suelo y Desertificación en el Mediterráneo) o HERMES (Procesos de Erosión-Sedimentación) (López-Cadenas & Romero, 1998; Boix-Fayos *et al.*, 2008).

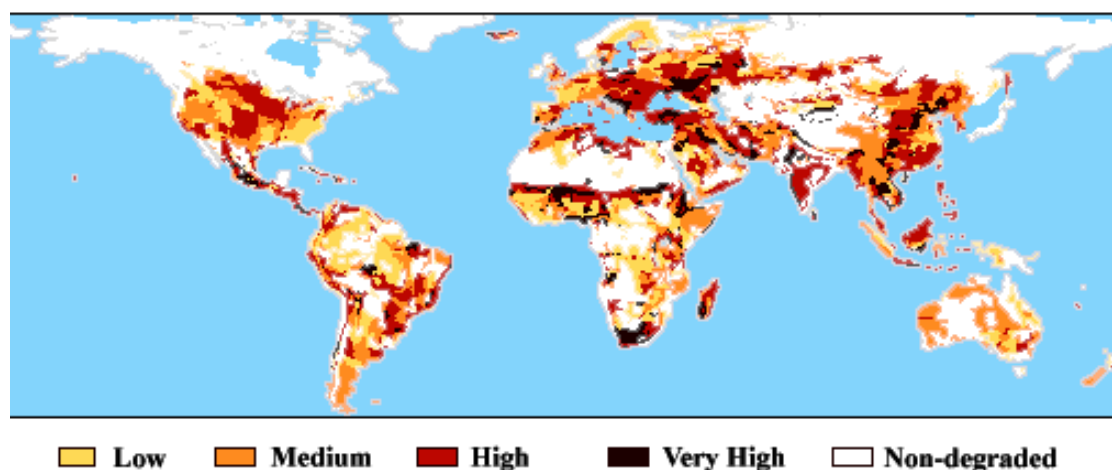


Figura 1.1. Mapa del estado de degradación de los suelos a escala mundial, proyecto GLASOD (UNEP) (GCMD, 2011)

Alfonso (2005) estima que la mitad de la superficie de la Península Ibérica sufre un riesgo moderado a muy grave de desertificación, y Rubio (2005) indica que un 10% de ésta sufre procesos de erosión y desertificación que pueden ser irreversibles. La pérdida de suelo por erosión en nuestro país ha sido estimada por De Alba (1998) en 23,37 toneladas por hectárea al año, con valores máximos de 47,8 y 44,6 $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, respectivamente, en las cuencas del Sur-Mediterráneo y Guadalquivir, y mínimos de 4,8 $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ en la cuenca norte (Ibáñez *et al.*, 2003).

A nivel nacional, de acuerdo con los mapas de estados erosivos elaborados por el ICONA y la Dirección General de Conservación de la Naturaleza entre 1987 y 2002 (Figura 1.2), la intensidad del proceso de erosión supera los límites tolerables en torno al 45% de la superficie de España, y unas 6 millones de hectáreas de ésta sufre erosión muy severa, con arrastres que ocasionan unas pérdidas de suelo que superan las 50 toneladas por hectárea y año, cifras muy elevadas si contrastamos con la tasa de formación de suelos, que varía entre 2 y 12 toneladas por hectárea y año (Ibáñez *et al.*, 2003; PAND, 2008).

En la Tabla 1.2 se pueden observar las pérdidas medias de suelo (en $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) que se producen en función de los distintos usos de suelo que se determinaron para la elaboración del mapa de estados erosivos. Los cultivos que presentan mayores valores de pérdidas de suelo son los cultivos arbóreos y viñedos de secano, así como los cultivos herbáceos de secano, mientras que los valores mínimos se registran en

arbolado con fracción de cabida cubierta superior al 0,7%, y en pastizales permanentes, si bien, la ubicación de estos cultivos en cuanto a pendiente del terreno, principalmente, y a las prácticas de manejo del suelo, es el factor que condiciona en mayor medida el potencial erosivo de estas zonas (PAND, 2008).

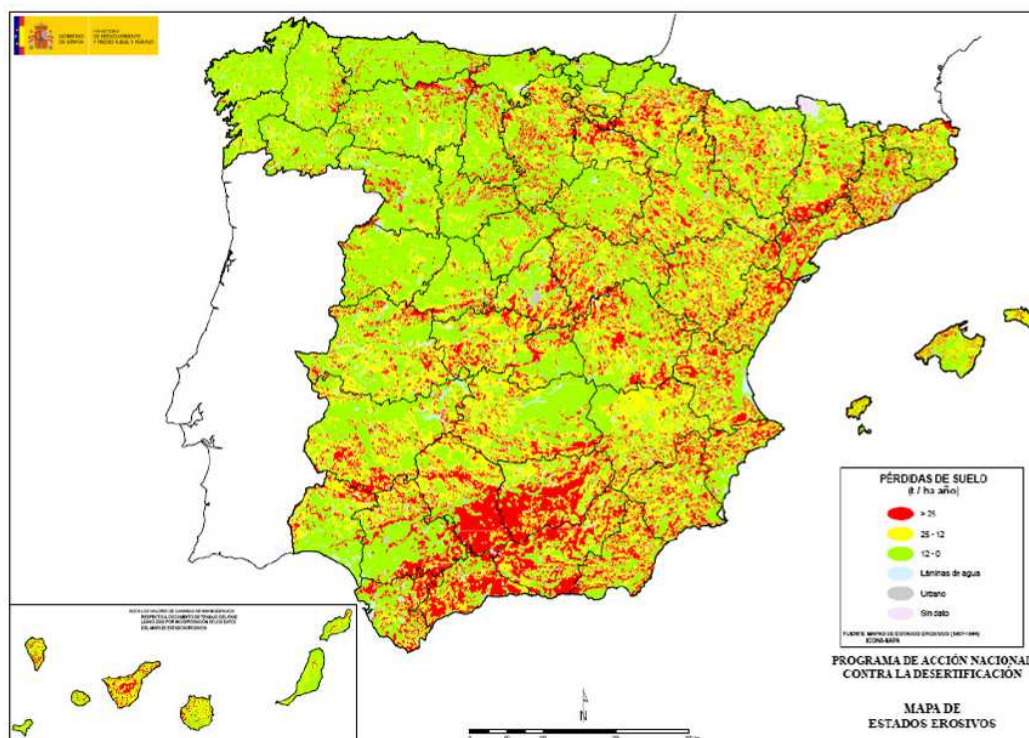


Figura 1.2. Mapa de estados erosivos elaborado por el ICONA entre 1987 y 2002 (PAND, 2008)

Tabla 1.2. Pérdidas de suelo en los distintos usos del suelo (PAND, 2008)

ESTRATO	SUPERFICIE (ha)	PÉRDIDAS MEDIAS (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
Cultivos de regadío	3.054.078	10,35
Cultivos arbóreos y viñedos de secano	5.113.437	78,93
Cultivos herbáceos de secano	14.804.776	30,53
Erial a pastos, matorral disperso y arbolado con cabida cubierta < 0,2	8.231.174	17,46
Pastizales permanentes	2.141.306	8,08
Arbustos y matorral	5.200.907	19,14
Arbolado con cabida cubierta entre 0,2 y 0,7	5.984.709	8,36
Arbolado con cabida cubierta > 0,7	4.535.843	5,16

De acuerdo con la Dirección General de Conservación de la Naturaleza, en 2003 las pérdidas medias de suelo que sufría la cuenca del Duero eran de 10,61%, registrando mayores valores en zonas con cultivos arbóreos y viñedos de secano situados sobre fuertes pendientes y sin prácticas de conservación del suelo adecuadas, donde se



producen estas pérdidas por erosión hídrica laminar y en regueros (López-Bermúdez, 2008; PAND, 2008).

En el ámbito regional, según los datos del Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación (PAND, 2008), el 70,3% de la superficie de Castilla y León sufre riesgo de desertificación, siendo en el 4,2% de ésta alto o muy alto, y en concreto, en la provincia de Ávila, la superficie afectada por desertificación asciende al 69,5%.

1.2. LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA ZONA MEDITERRÁNEA

Las particulares características de la vertiente mediterránea la hacen especialmente vulnerable a los procesos erosivos. La ocupación en esta área ha sido especialmente intensa, ocasionando gran cantidad de interacciones entre el medio natural y los seres humanos, interacciones que se desarrollan en el suelo afectando y dañando su estructura. Los factores físicos de la vertiente mediterránea que condicionan gravemente los procesos erosivos son los siguientes (Conesa & García, 2007a):

- La variabilidad en el clima: el clima mediterráneo se caracteriza por intensas lluvias durante el invierno y grandes periodos de sequías en la época estival.
- La existencia de suelos fácilmente erosionables: Con estructura débil, poca profundidad y escasa materia orgánica.
- Relieves accidentados: Presencia de relieves con gran modelación y fuertes pendientes.

Estas características promueven la formación de torrentes, barrancos, *badlands* y otros sistemas que favorecen tanto la generación como el transporte de sedimentos (Casali *et al.*, 2000; Poesen *et al.*, 2002; Conesa, 2005). Pero además existen factores socio-económicos de la región mediterránea que condicionan los procesos de erosión (Kelley, 1990; Yassoglou, 1990; PAP/RAC, 1997; González *et al.*, 2005; Conesa & García, 2007a):

- Abandono de la agricultura, y por tanto de las tierras, con los consecuentes daños en las obras asociadas, tales como las llevadas a cabo para conservar el recurso agua y el recurso suelo.
- Los incendios forestales, que afectan gravemente a esta región.
- La deforestación, que produce sedimentos y los emite a los cauces. La pérdida de masa forestal (ya sea por incendios o por deforestación) ocasiona inevitables pérdidas de suelo.
- La intensificación de la agricultura, con una escasa roturación de cultivos y una gran mecanización de las tareas agrícolas.
- El sobrepastoreo
- La sobreexplotación de los recursos

En la vertiente mediterránea existen más de 200.000 km² de territorio europeo en serio riesgo de erosión (Giordano & Marchisio, 1989), y en concreto en España más de 100.000 km² supera tasas de erosión de 12 t·ha⁻¹·año⁻¹ (ICONA, 1988).



1.3. FORMAS DE EROSIÓN HÍDRICA: LA EROSIÓN EN CÁRCAVAS

El transporte de las partículas de suelo, una vez disgregadas puede darse superficialmente, bien por la acción de las precipitaciones o bien a través de la escorrentía superficial; o en profundidad. Esta última se debe a la acción oculta del agua que ocasiona desplazamientos del terreno por efecto de la gravedad, y se ve favorecida cuando se produce la saturación del suelo, o cuando el agua alcanza a un horizonte del suelo que se encuentra apoyado en un estrato impermeable. En cuanto al transporte superficial, las precipitaciones provocan el transporte de las partículas debido al impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, que causan su disgregación y su proyección en el aire, dando lugar a la denominada erosión por salpicadura (Morgan, 1997). No obstante, el desprendimiento de las partículas constituyentes del suelo también puede deberse a procesos de meteorización mecánica, como la congelación y deshielo, el soleamiento, y la humectación-desección, o de meteorización bioquímica. El transporte superficial también se puede producir por escorrentía superficial, que origina una lámina de agua que disgrega y transporta las partículas del suelo, acciones que se ven favorecidas por la pendiente del terreno. El caudal de la escorrentía y la concentración de sedimentos en ese caudal son, de acuerdo con Cerdá & Navarro (1997) los dos factores determinantes de las tasas de erosión. La escorrentía superficial alcanzará los mayores valores con altas intensidades de precipitación, baja capacidad de infiltración del suelo y pendientes fuertes (Hudson, 1982; Morgan, 1997; Cerdá, 2001).

Estas dos causas (salpicadura y escorrentía superficial) originan la denominada erosión laminar, que causa la pérdida del suelo en capas delgadas y sucesivas, y suele surgir en una primera fase. Posteriormente se sucede la erosión en regueros, que se producen perpendicularmente a las curvas de nivel, debido a la concentración del agua en zonas puntuales. Y por último, si se sigue produciendo un aumento de la escorrentía, en términos de volumen o de velocidad, y la erosionabilidad diferencial del terreno, se produce la denominada erosión en barrancos o en cárcavas (IGME, 1989; Mintegui & López, 1990; Morgan, 1997). Por esta razón, la existencia de cárcavas indica que el terreno en el que se localizan ha sufrido o está sufriendo un grado elevado de degradación, de forma que una erosión intensa en cárcavas y barrancos en una zona concreta genera un paisaje fuertemente disectado denominado malas tierras, mal país o *badlands* (Clotet *et al.*, 1987), si bien puede haber terrenos acarcavados relativamente estables, como el caso del Desierto de Tabernas en el sureste de España (Cantón, 1999; Cantón *et al.*, 2001; Solé-Benet *et al.*, 2009).

La erosión en cárcavas es un fenómeno que se produce bajo diversas condiciones climáticas (Gómez *et al.*, 2011), más comúnmente en climas semiáridos con un marcado contraste estacional y menos frecuentemente en regiones subhúmedas y húmedas y en zonas desérticas, si bien se desarrollan sobre suelos estériles, con vegetación abierta, con usos inapropiados del suelo o un diseño inadecuado de la red de vías de comunicación (Bryan & Yair, 1982; Campbell, 1997; Torri *et al.*, 2000; Valentín *et al.*, 2005; Nadal *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2012; Gallart *et al.*, 2013). Las cárcavas se definen como una serie de profundas incisiones inscritas en la ladera y



sujetas a avenidas bruscas e intermitentes, y que surgen cuando una corriente de agua natural rompe su estado de equilibrio metaestable (Faustino, 1985; Hudson, 1982; Rivera *et al.*, 2007). Los cursos de agua fluctúan hacia un punto de equilibrio, de forma que si el caudal se incrementa, el canal se ensanchará, profundizará o incrementará su gradiente hasta conseguirlo, y sólo podrá recuperar su estado original si las alteraciones son leves; pero si la cárcava comienza, será necesario un esfuerzo de mayor magnitud para conseguir esa situación inicial. En la denominada erosión por cárcavas, el escurrimiento superficial es grande y con elevada energía erosiva, de forma que se concentra dando lugar a surcos o cárcavas que pueden alcanzar decenas de metros, tanto en dimensión longitudinal como en vertical, originando, como consecuencia, contaminación, debido a la movilización de sedimento que producen, y causando una pérdida de productividad del terreno afectado (Faustino, 1985; Casali *et al.*, 1999; Valentín *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2007).

De acuerdo con el perfil longitudinal de una cárcava, en su fase inicial, la sección del canal es más profunda que la original, y su coeficiente de rugosidad aumenta, al desaparecer la cubierta vegetal, consiguiendo un nuevo gradiente más llano que el original, y una mayor altura de caída del agua conforme va retrocediendo la cabecera de la cárcava (Hudson, 1982; Clarke & Rendell, 2006). No obstante, la extensión de las cárcavas se realiza en tres direcciones (Faustino, 1985; FAO, 1992): en longitud, debido al avance y caída de la escorrentía; en anchura, por las mismas razones anteriores, o por caída de las paredes de las laderas por falta de estabilidad; y en profundidad, por efecto de la escorrentía, hasta llegar a su estabilización en el nivel de base. Este avance en extensión de las cárcavas se ve favorecido en gran parte por las prácticas inadecuadas de utilización de la tierra, como en el caso de construcciones civiles y minería, que originan cortes del terreno que quedan a merced del agua, y por la realización de surcos en campos de cultivo, que gracias a la acción de la lluvia y la concentración de flujos tienden a profundizarse y con el tiempo causar este proceso (León, 2005). El fuego o el sobrepastoreo son acciones que reducen la cubierta vegetal, causando una reducción de la resistencia, o, dicho de otra manera, una disminución de la rugosidad, que provoca una mayor velocidad del caudal, con sus correspondientes consecuencias en términos de erosión. Ejemplos de acciones que provocan un aumento en la velocidad del flujo, y por tanto de la erosión, son la construcción de un puente o el trazado de aliviaderos de tierra en pequeños embalses, así como la concentración de escorrentías en ciertos puntos a través del diseño del drenaje de obras de infraestructura, actuaciones agrarias, etc. Además, hay que señalar que la erosión por cárcavas es la fuente más importante de sólidos en suspensión en los ríos (Hudson, 1982; Clotet *et al.*, 1987; Casali *et al.*, 1999; Valentín *et al.*, 2005; Clarke & Rendell, 2010;), lo que reduce considerablemente la calidad de las aguas (Simon & Darby, 1999; Zaimas *et al.*, 2009).

Por tanto, la evolución y la forma que van tomando las cárcavas dependerán de varios grupos de factores (Casali *et al.*, 1999):

- Factores ligados al suelo: erosionabilidad, presencia de horizontes resistentes, presencia de costras o sellado, contenido de humedad (Moore *et al.*, 1988),



- elevada salinidad del suelo, naturaleza mineralógica del terreno (arcillas expandibles) (Clotet *et al.*, 1987; Gallart *et al.*, 2013).
- Factores topográficos: tamaño de la cuenca de aportación (Poesen & Govers, 1990), pendiente del cauce y laderas (Foster, 1986; Poesen & Govers, 1990; Poesen, 1993; Clarke & Rendell, 2006; Gallart *et al.*, 2013), y su exposición.
 - Factores climáticos: intensidad, frecuencia y duración de las precipitaciones (Valentín *et al.*, 2005).
 - Otros factores: fundamentalmente antrópicos, como el pastoreo, o las prácticas de cultivo, que consisten en manipular físicamente los cultivos y el terreno que ocupan, utilizando aperos agrícolas, por ejemplo, para conseguir a un buen crecimiento de las plantas. Unas malas prácticas de cultivo, un sistema de riego inadecuado, la extracción abusiva de leña o el sobrepastoreo favorecen a la erosión por cárcavas (Valentín *et al.*, 2005; Gallart *et al.*, 2013). La apertura de zanjas por los agricultores para proteger a los campos de la escorrentía pueden llegar a ser el inicio de cárcavas y barrancos (Gallart, 1992, 2009; Gallart *et al.*, 2013). Pero también los hay naturales como incendios, que destruyen la cubierta vegetal y la cubierta orgánica muerta del suelo (Fernández & Vega, 2011), fuertes vientos que derrumban el arbolado y que si son precedidos de tormentas generan acumulaciones de agua en puntos concretos del terreno que favorecen el acaravamiento; deslizamientos de márgenes fluviales por la socavación de su base, etc.

En función de su temporalidad, las cárcavas pueden ser efímeras o permanentes (Gómez *et al.*, 2011). En función de la naturaleza y morfología del terreno se adopta la forma de la cárcava, y podemos distinguir entre cárcavas en V, situadas en terrenos de ladera, o cárcavas en U, que podemos encontrar en terrenos llanos (Núñez, 2001). En el primero de los casos, cuando se produce un crecimiento de las cárcavas hacia arriba y los lados de las laderas, podemos hablar de cárcavas remontantes (Federacafé, 1975). Asimismo, Stocking & Murnaham (2003) indican que las cárcavas pueden ser continuas o discontinuas, caracterizadas las segundas por su inferior nivel de pendiente con respecto al general del terreno, y porque erosionan ascendiendo hacia la cabecera, aunque la sedimentación se produzca al final de la discontinuidad. Por otro lado, en función de la torrencialidad, y definiendo torrente como una corriente natural de agua caracterizada por crecidas súbitas y violentas, fuertes pendientes y una periodicidad temporal o permanente (Del Palacio, 1999), se distingue entre cárcavas tipo torrentes-alpinos o torrentes alpinos (correcciones típicas pirenaicas en Canfranc, Arratiecho, Betés, etc.) y cárcavas tipo torrentes-rambla (actuaciones en las *badlands* de Murcia, Almería, etc.). Ambos sistemas tienen comportamientos diferentes. Los primeros, de régimen estacional, se sitúan en grandes altitudes, y en cauces estrechos, con pendiente media alta, y perfil transversal en forma de V. En estos torrentes se da un tipo de erosión laminar y movimientos en masa. Sin embargo, las cárcavas tipo torrentes-rambla, cuyo régimen puede ser estacional o permanente, son típicas de áreas mediterráneas, y se sitúan en pequeñas altitudes. Sus cauces son anchos y de pendiente baja, y se caracterizan por sufrir una erosión lineal, y de ladera y márgenes, y por ser zonas de depósito de sedimentos, razón por la cual poseen perfiles en forma de U muy abierta (Del Palacio, 1999, 2002). Pérez-Soba (2009)



distingue entre ramblas puras y torrentes ramblas, en función de la morfología del cauce y de la cuenca y de su régimen torrencial.

Las tasas de erosión que generan estas formaciones son inadmisibles. En España se alcanzan valores de entre 32 y 77 t·ha⁻¹·año⁻¹ en las cárcavas de las Bardenas Reales en Navarra (Desir & Marín, 2009) o tasas de entre 16 y 63 t·ha⁻¹·año⁻¹ en las cárcavas del Penedés en Cataluña (Martínez *et al.*, 2009). No obstante, cuando la vegetación ocupa más del 30% de la superficie de las cárcavas las tasas de erosión son bajas (Cantón *et al.*, 2001) o se trata de cárcavas inactivas que no sufren prácticamente los procesos erosivos (Rey, 2003; Hooke, 2006; Martínez *et al.*, 2009).

Las cárcavas no sólo se producen en terrenos margosos y regiones de topografía accidentada, sino también en suelos que sufren encostramiento (meseta de Loess o América del Norte), suelos arenosos (zona del Sahel, noreste de Tailandia) o en suelos propensos a tubificaciones (Valentín *et al.*, 2005). Es decir, las cárcavas son características de muchos paisajes, pero se desarrollan especialmente en climas mediterráneos, tal y como señalan Clarke & Rendell (2010), como en Italia (Ciccacci *et al.*, 2008; Clarke & Rendell, 2006; Gallart *et al.*, 2013), Grecia, Marruecos, Israel (Yair *et al.*, 1980) y España (López & Torcal, 1986; Benito *et al.*, 1992; Regüés, 1995; Casali *et al.*, 1999; Regüés *et al.*, 2000; Cantón *et al.*, 2001; Martín-Duque, 2007; Martínez *et al.*, 2009; Marín & Desir, 2010; Navarro *et al.*, 2014). Sin embargo, el área de estudio está situada en la cuenca del Duero, donde son atípicas las formaciones de *badlands* y en donde se da un clima subhúmedo y continental, ambiente poco estudiado en formaciones de cárcavas (Navarro *et al.*, 2014).

1.3.1. CORRECCIÓN Y CONTROL DE CÁRCAVAS

El control de cárcavas es una tarea ardua y costosa; volver a la posición de equilibrio original requiere un gran esfuerzo. Además, hay que tener en cuenta que la existencia de cárcavas es un reflejo de la degradación de la cuenca, o de un manejo hídrico deficiente de la cuenca. Es necesario estudiar los orígenes de estas cárcavas para que las tareas de control que se lleven a cabo sean efectivas. La solución más lógica teniendo en cuenta estas circunstancias sería prevenir y evitar que se produzcan estas cárcavas, o evitar que se continúe erosionando, es decir, en muchas ocasiones será suficiente realizar un control parcial, considerándolas como parte del paisaje (Hudson, 1982); la implantación de una efectiva cubierta vegetal que tapice las paredes de las cárcavas puede frenar su progresión (Navarro *et al.*, 1997; Navarro *et al.*, 2014; Mongil *et al.*, 2013). Rey (2003) y Martínez *et al.* (2009) señalan que cuando la cubierta de vegetación sobre el lecho de las cárcavas supera el 30 % éstas resultan casi inactivas o explican bajas tasas de erosión (Cantón *et al.*, 2001).

Los objetivos del control de cárcavas justifican su inversión, como cuando se pretenda evitar el descenso de la capa freática, la pérdida de capacidad de almacenamiento de embalses, la posibilidad de que afecte a construcciones (puentes, carreteras o edificaciones), afecten a la calidad del agua, perturben los hábitat acuáticos de gran valor ecológico o la pérdida de suelo y su productividad. Completando las



recomendaciones de Hudson (1982) se señalan una serie de principios a seguir en el control de cárcavas:

- Determinar las causas
- Determinar los impactos y efectos más significativos en su entorno
- Diseñar una serie de medidas proporcionales a los impactos o perturbaciones a corregir y adoptar dichas medidas.
- Restaurar un balance hidráulico adaptado a las nuevas condiciones (para reducir o controlar el caudal al volumen aceptable para las condiciones originales o las nuevas adoptadas).
- Proteger la zona donde vayan a aplicarse las medidas de recuperación y control.
- Establecer un seguimiento periódico para estudiar la evolución adecuada del sistema e impedir su regeneración

Entre las técnicas para el control de cárcavas, podemos mencionar en primer lugar técnicas de manejo de suelo que incrementen la infiltración, o construcción de estructuras que conserven o extiendan la escorrentía (terrazas, zanjas de interceptación en cabecera o a media ladera, microcuencas de captación, etc.).

Para evitar el avance de la cárcava en tres dimensiones, como se ha mencionado anteriormente, se podrían utilizar técnicas como realizar su aislamiento de la escorrentía y del ganado, o de otros usos no compatibles (extracción de leñas, utilización de materiales térreos para construcción de adobes, etc.), para a continuación realizar su relleno total, parcial o terraplenado. Esto conllevará su eliminación, o bien a suavizar los taludes para construir barreras o para poder reforestar la cárcava.

Sin embargo, si bien existen muchas técnicas eficaces para la prevención y la corrección de cárcavas (revegetación, terrazas y diques de retención), no son adoptadas por los agricultores ya que no suelen asociarse con un beneficio a corto plazo en términos de un aumento de la productividad de la tierra (Valentín *et al.*, 2005).

Las principales técnicas para el control y la corrección de cárcavas se exponen a continuación.

1.3.1.1. La revegetación en el control de cárcavas

La revegetación de cárcavas es una buena medida para su control, ya que protege al suelo de la escorrentía a la vez que reduce la velocidad del caudal, y por lo tanto su energía erosiva (Díaz *et al.*, 2012). Autores como Rey (2003), Hooke (2006) y Torri *et al.* (2013) destacan la importancia de la vegetación para el control de los procesos erosivos asociados a cárcavas ya que consiguen reducir las tasas inadmisibles que generan. No obstante, Navarro *et al.* (1997) indican que en áreas de la región mediterránea, con un clima semiárido, en exposiciones de solana y sobre margas-



yesíferas, esta técnica no ha dado los resultados esperados, a pesar de que señalen que es preferente actuar con material vegetal antes que con movimientos de tierra o estructuras constructivas. Las dificultades en su implantación se deben a que el suelo de una cárcava suele ser deficiente en nutrientes y en materia orgánica, y con escasa retención de humedad, y a que suelen estar localizadas en zonas de escasas precipitaciones, que no permiten un tapiz vegetal continuo y que deja caminos expeditos para la concentración de escorrentías. Además, los deslizamientos en las paredes de las cárcavas pueden ser objeto de arrastre de las plantaciones realizadas. Sólo si se actúa en un medio suficiente estable y con unas condiciones hídricas apropiadas se consigue la regeneración. Por otro lado, Hudson (1963) indica que los suelos sometidos a acarcavamiento suelen tener problemas de salinidad y alcalinidad. Para solucionar las posibles dificultades que puedan surgir se deben elegir las plantas apropiadas, de fácil arraigo y vigorosas, así como emplear técnicas especiales para asegurar el éxito de la plantación, como el uso de fertilizantes.

Además, para ayudar al establecimiento de la vegetación de la cárcava, se pueden acompañar estas medidas con barreras fabricadas con materiales de origen natural, tales como ramas (palizadas, fajinas, zarzos, etc.), troncos o piedras (muretes de reconstitución, bancales, etc.), que serán de carácter temporal, a no ser que el estado de la cuenca requiere la instalación de estructuras permanentes. O bien aplicando técnicas de bioingeniería más recientes, como el empleo de geotextiles, que igualmente ayudan al asentamiento de la vegetación en laderas degradadas. Los estudios realizados por Navarro *et al.* (1997) demuestran el éxito de los geotextiles orgánicos combinados con la revegetación, ya que concluyen que, una vez aplicados, ofrecen un recubrimiento del 100% del suelo tratado; si bien, debido a su alto coste, aconsejan su empleo en cárcavas que afecten a terrenos productivos, ecosistemas singulares, obras civiles o la calidad de las aguas.

1.3.1.2. Estructuras temporales para el control de cárcavas

Las estructuras temporales sirven de protección temporal, para dar tiempo y facilitar la implantación y el arraigo de la vegetación. Retienen la tierra fértil y la humedad y pueden consistir en (Hudson, 1982; Sharma, 1993; FAO, 2000):

- Barreras de piedras sueltas, que consisten en piedras sujetas con una red metálica construyendo una presa. Se emplean cuando la pendiente del lecho es moderada, y el área de drenaje es pequeño o moderado, y cuando en la zona se encuentran abundantes piedras.
- Barreras de piedras con malla metálica, con las mismas características y en las mismas condiciones que el anterior, sólo que las piedras van sujetas con una malla de alambre.
- Presas de red: postes metálicos clavados en el lecho que sujetan una red metálica, sobre la cual se aplica paja y broza suelta para constituir una barrera porosa.



- Barreras de ramas secas, apiladas o amarradas entre filas de estacas verticales. Deben estar lo suficientemente enterradas para que no se desmoronen. Se emplean cuando el área de drenaje es de pequeño tamaño.
- Barreras de troncos, formando un entramado más firme que en el caso anterior. Se emplean cuando la carga es violenta y en altura, por ejemplo en la cabecera de la cárcava.
- Barreras de adobe, que pueden fabricarse con la propia tierra del lecho de la cárcava.

1.3.1.3. Estructuras permanentes para el control de cárcavas

Las estructuras permanentes se emplean cuando el problema de la erosión por cárcavas sea de mayor envergadura, en el que no serían eficaces las estructuras temporales, y su principal objetivo es resistir las avenidas torrenciales para siempre.

Hudson (1982) agrupa las distintas estructuras de carácter permanente según la función a la que estén destinadas. De esta forma, si se pretende evitar el avance de la cabecera de las cárcavas que puede llegar a producir problemas de derrumbamiento en puentes, carreteras o edificios, se pueden construir un dique en la cabecera de la cárcava, que se encontrará inundado continuamente si se ha dejado un espacio libre entre la estructura y la cabecera. También se puede llegar a conseguir estabilizar la cabecera de la cárcava empleando las estructuras de obra de fábrica o de hormigón que Hudson (1982) denomina “estructuras de pendiente”, y que ocasionan un daño menor.

Pero si la función que se pretende que realicen estas estructuras es regular el impacto de la crecida, se acude a la construcción de diques de regulación, que poseen un desagadero abierto, cuyo funcionamiento consiste en la recogida del agua de una tormenta y su desagüe para la próxima crecida.

Por último, cuando el fin de estas construcciones sea la retención de sedimentos, y las anteriores soluciones no sean válidas debido a una excesiva carga de estas partículas, se acude a presas permanentes que retienen los aluviones.

Los materiales son variados. Desde estructuras reticulares de madera, perfiles o jaulas metálicas rellenas de cascajo o piedra a estructuras de mampostería seca, mampostería hidráulica, hormigón en masa, hormigón armado, presas de tierra, de otros materiales reciclados como neumáticos, bidones o contenedores, etc. (Figura 1.3).

Entre las estructuras permanentes citadas para el control de cárcavas se encuentran los diques de gaviones, que merecen una mención especial, al haber sido empleados con gran frecuencia en la corrección de cárcavas, torrentes y ramblas en todo el mundo y que conforman todas las estructuras que se analizan en el presente trabajo en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila), cuyo proyecto fue redactado en 1964 y ejecutado en 1965.



Figura 1.3. a: Trinchos escalonados de guadua (*Guadua angustifolia*) en Palestina (Rivera, 1998). b: Dique de mampostería gavionada en Tórtoles (Ávila). c: Dique de mampostería seca en China (Messines, 1958). d: Dique de mampostería hidráulica en Risco Blanco (Gran Canaria)

1.4. LAS RESTAURACIONES HIDROLÓGICO-FORESTALES CON CONSTRUCCIONES CIVILES

Clásicamente se define la restauración hidrológico-forestal como el conjunto de planes, programas, proyectos y trabajos destinados a la defensa y conservación del suelo, la regulación de la escorrentía y el control de las avenidas, la retención de sedimentos, la recuperación de la fertilidad del suelo, y la consolidación de laderas y cauces, y que, en definitiva, buscan frenar la erosión (Rojo, 1990; Ferrer, 2009).

1.4.1. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

La realización de estos trabajos de restauración se remonta a mediados del siglo XIX, y nace en Europa con el fin de dar una solución a la deforestación que estaban sufriendo sus territorios montañosos, debido a cortas abusivas, roturaciones del terreno o explotaciones indiscriminadas, entre otras. En consecuencia, estos lugares estaban sometidos a aludes en invierno y deshielos en primavera, así como a las lluvias torrenciales en zonas mediterráneas, que originaban inundaciones y avenidas, con sus consecuentes efectos negativos. Así, se llevaron a cabo trabajos de restauración en



zonas montañosas en Suiza (1948), Francia (1882), Austria (1884) y España (1888) (Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

Las causas que motivaron que en 1888 se llevara a cabo la primera restauración forestal en nuestro país fueron las catástrofes del Júcar en 1864, y del Guadalentín y el Almanzora en 1879. Esta restauración se materializó en el “Plan sistemático de repoblación de cabeceras de cuencas hidrográficas”, que comprendía a las cuencas del río Júcar, del río Segura, del río Lozoya, y de las dunas de Cádiz y Huelva. En ese mismo año, el 3 de febrero, se promulgó un Real Decreto que hacía referencia a la organización de los trabajos de repoblación en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de España (Mintegui & Robredo, 1994; Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

En 1901 se crea el Servicio Hidrológico-Forestal de la Nación, que abarca las principales cuencas hidrográficas del territorio español mediante su distribución en diez Divisiones Hidrológico-Forestales. A través del Real Decreto de 7 de junio de 1901 se crearon los Servicios Hidrológico-Forestales, responsables de las extensas zonas arboladas que actualmente pueblan nuestra península. De esta manera, se comienza a unir en la práctica lo hidrológico y lo forestal, denominación bien acertada que da una idea de la importancia que tiene el bosque en el ciclo hidrológico. En estos principios del siglo XX se realizan restauraciones emblemáticas en sierra Espuña, en Canfranc y en la cuenca del Lozoya, entre otras (Mintegui & Robredo, 1994; Martínez *et al.*, 1996; Del Palacio, 1999; Ferrer, 2009; Fernández-Ontoño *et al.*, 2010).

Posteriormente, en 1926 se crean las Confederaciones Hidrográficas, que también tenían competencias en este campo. Las Divisiones Hidrológico-Forestales siguen trabajando hasta que son absorbidas en 1952 por el Patrimonio Forestal del Estado, y finalmente desaparecen en 1968, asumiendo sus funciones los Servicios Hidrológico-Forestales provinciales. Estos servicios pasan a depender del Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) cuando se crea este organismo en sustitución del Patrimonio Forestal, en 1971. (Del Palacio, 1999; Gil, 2004; Del Palacio, 2013)

Con la creación de las Comunidades Autónomas, en 1984 éstas asumen las competencias en restauración hidrológico-forestal, si bien de forma compartida con la administración estatal, a través de convenios entre las Comunidades Autónomas y el Ministerio de Medio Ambiente. Así, en 1985 se firmaron convenios entre las Comunidades Autónomas y el ICONA, que tenían como objeto la restauración hidrológico-forestal de cuencas; y a partir de 1986, con la entrada de nuestro país en la Comunidad Europea, los convenios establecidos con ésta han servido para transferir y canalizar los fondos europeos, como el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), que se aplica desde las Confederaciones Hidrográficas, o el Fondo Europeo de Orientación y Garantía Agrícola (FEOGA) (Del Palacio, 1999; Gil, 2004; MARM, 2011a). En este marco, se han llevado a cabo una serie de actuaciones en materia de restauración hidrológico-forestal, a través de la actual Dirección General de Medio Natural y Política Forestal del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, que incluyen repoblaciones forestales con especies del máximo valor ecológico posible dentro de las condiciones de clima, topografía y suelo, tratamientos de masas



boscosas con la finalidad de mantener y mejorar el buen estado selvícola de la cubierta vegetal protectora, y obras de corrección de cauces torrenciales y ramblas como acciones de defensa activa inmediata para disminuir arrastres y acarreos sólidos, impidiendo su incorporación a los cauces fluviales y a la red de embalses. Los datos del volumen de estas actuaciones y de la inversión total ejecutada por esta Dirección General, y con base en los Fondos de la Unión Europea, principalmente FEOGA-Orientación y, hasta el año 2000, el Fondo de Cohesión, correspondiente a las señaladas actuaciones se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Actuaciones de restauración hidrológico-forestal llevadas a cabo por la Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA, 2013)

	Superficie repoblada (ha)	Unidades de obra efectuadas (m ³)	Tratamientos de masas boscosas (ha)	Inversión ejecutada
1997	10.441	71.434	71.434	35.020,98
1998	7.961	92.124	92.124	30.190,04
1999	7.008	50.157	50.157	30.727,95
2000	3.882	43.256	43.256	25.972,74
2001	2.415	226.019	226.019	16.843,97
2002	2.507	49.314	8.850	21.796,70

Del Palacio (2013) realiza una gráfica comparativa entre las repoblaciones realizadas y las obras de corrección ejecutadas entre los años 1940 y 2010 (Figura 1.4), en la que se puede observar como la superficie repoblada fue incrementado desde el inicio del periodo hasta alcanzar un máximo en 1957 de 135.987 hectáreas repobladas. En la década de los 70 se mantenía una media de 100.000 hectáreas anuales, cifra que se fue reduciendo en los años posteriores, de forma que cuando se produjo el traspaso de competencias de gestión forestal a las Comunidades Autónomas se redujo de nuevo la superficie repoblada, aunque en los últimos años de la década de los 90 se produjo un nuevo ascenso, probablemente debido al apoyo financiero recibido por aplicación de los Fondos Estructurales y de Cohesión de la Unión Europea. En cuanto a las obras de corrección, supone un volumen total en el periodo considerado superior a los 6,86 millones de metros cúbicos, con unos mayores valores en la década de los 90, muestra de la creciente preocupación por el control del fenómeno torrencial y erosivo, y la búsqueda de la seguridad de las tanto de las poblaciones, cultivos e infraestructuras.

Las Comunidades Autónomas realizan inversiones similares a las anteriormente señaladas que realiza la Dirección General de Medio Rural y Marino. Además reciben ayudas, concedidas por la Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal y cofinanciadas por el FEOGA, para la gestión sostenible de los montes públicos que tienen como objeto mantener y potenciar las funciones protectoras, ecológicas y sociales de las zonas de montaña y cabeceras de cuencas, que en el año 2002 fueron cercanos a los 7.000.000 € (MAGRAMA, 2013).

Gracias a estas ayudas, son muchas las restauraciones hidrológico-forestales llevadas a cabo en nuestro país. Los trabajos realizados en las cuencas de los torrentes de

cabecera de los ríos Aragón, Gallego, Noguera Ribargorzana o Noguera Pallaresa en la cornisa pirenaica, en las cuencas de las ramblas de los ríos Guadalmedina, Almanzora y Oria, en las cuencas de los ríos Jalón y Jiloca y en la Cuenca Hidrográfica del río Segura, en las torrenciales ramblas levantinas, o las actuaciones llevadas a cabo en el Valle del Lozoya, Sierra Espuña o Sierra Nevada, son algunos ejemplos de restauraciones hidrológico-forestales en España (Del Palacio, 2002; Gil, 2004; Del Palacio, 2013).

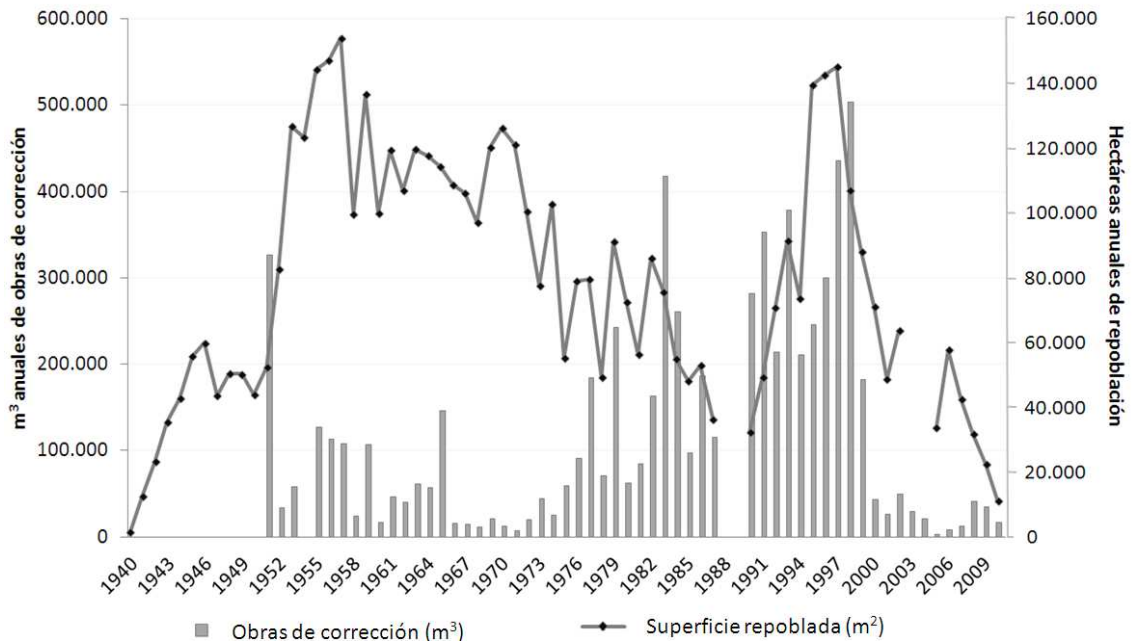


Figura 1.4. Repoblaciones y obras de corrección efectuadas en España en los años 1940-2010 (modificado de Del Palacio, 2013)

Por otro lado, la Directiva Marco Del Agua (UE, 2000) implica una auténtica revolución conceptual en los criterios de gestión de los recursos hídricos. Plantea como objetivo básico conseguir el “buen estado ecológico” de las aguas basándolo en aspectos:

- Cuantitativos: El régimen natural como referencia básica
- Cualitativos: Objetivos de calidad para garantizar la biota acuática
- Biológicos: Composición y estructura de poblaciones de macroinvertebrados, peces...
- Morfológicos: Mantenimiento de la dinámica geomorfológica del sistema fluvial

En todos ellos la cubierta forestal juega un papel fundamental, y por lo tanto, la restauración hidrológico-forestal.

La Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, modificada por la Ley 10/2006, de 28 de abril, atribuye al actual Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (hoy Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), las actuaciones de restauración hidrológico forestal, junto con los trabajos de conservación de suelos y lucha contra la desertificación, si bien, de acuerdo con el ordenamiento jurídico, realiza estas actividades en colaboración con las Comunidades Autónomas. A través de la Ley de Montes se aprueba el “Plan Nacional de actuaciones prioritarias de restauración

hidrológico-forestal, control de la erosión y defensa contra la desertificación”, que preveía la identificación y diagnóstico, por subcuencas, de los procesos erosivos, su intensidad y el riesgo para las poblaciones, cultivos e infraestructuras, a través de la definición de 5 zonas prioritarias de actuación que cubren una extensión de 18,4 millones de hectáreas (Figura 1.5) (MAGRAMA, 2013):

- Prioridad 1 : 2,0 Millones de hectáreas
- Prioridad 2 : 3,4 Millones de hectáreas
- Prioridad 3 : 6,5 Millones de hectáreas
- Prioridad 4 : 5,5 Millones de hectáreas
- Prioridad 5 : 1,0 Millones de hectáreas

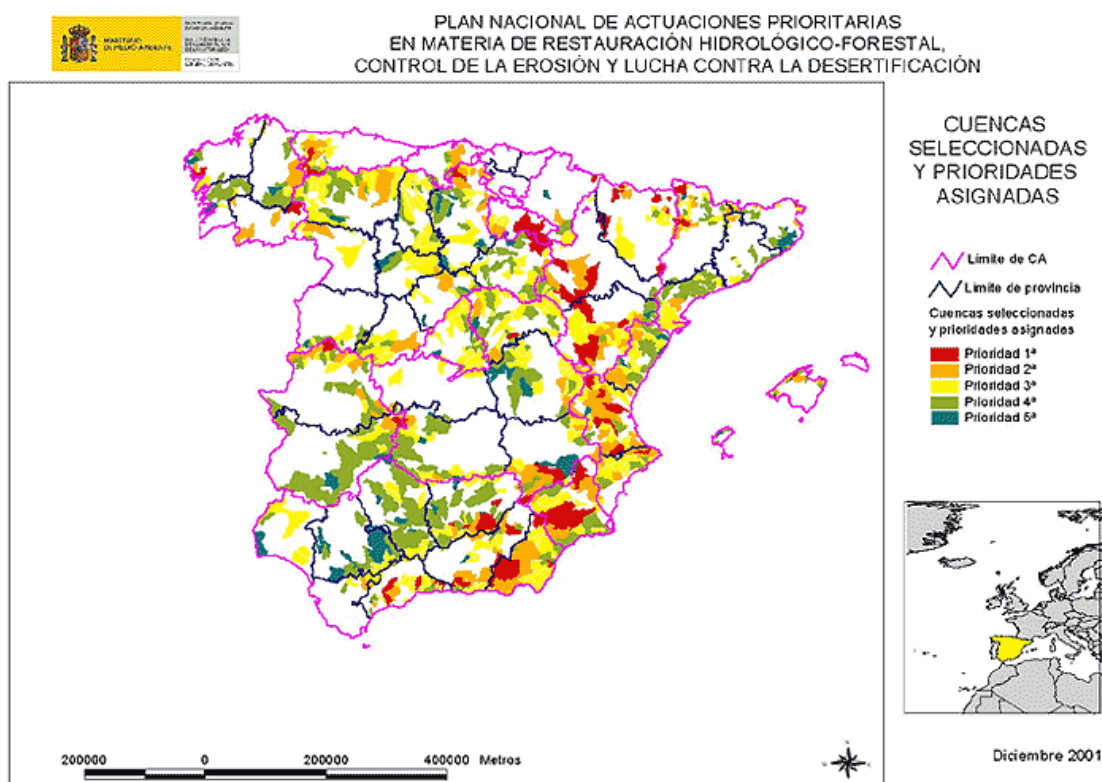


Figura 1.5. Zonas prioritarias de actuación definidas en el Plan Nacional de Actuaciones Prioritarias de Restauración Hidrológico-Forestal (MAGRAMA, 2013)

La propuesta del plan es actuar sobre 3,5 millones de hectáreas (19% de las zonas seleccionadas) de la siguiente forma:

- 1,1 millones de hectáreas con repoblaciones forestales
- 1,1 millones de hectáreas dedicadas a reforestación de tierras agrarias
- 0,4 millones de hectáreas con tratamientos selvícolas
- 80.090 hectáreas a las que se le aplicarán mejoras o se implantarán pastizales y matorrales
- Prácticas de conservación de suelos sobre 0,8 millones de hectáreas
- 50.000 hectáreas con actuaciones de restauración de riberas



La señalada colaboración entre administración regional y autonómica se plasmó, para la Comunidad Autónoma de Castilla y León, a través del Convenio de Colaboración 2009-2010 entre el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y la Comunidad Autónoma de Castilla y León sobre actuaciones de la Dirección General de Medio Natural y Política Forestal en materia de Restauración Hidrológico Forestal, aprobado mediante la resolución de 27 de noviembre de 2009, de la Dirección General de Relaciones Institucionales y Acción Exterior.

1.4.2. OBJETIVOS DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL

Mintegui & Robredo (1994) clasifican los objetivos de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica en tres grupos:

- La retención de suelo mediante el control de la erosión
- La regulación de las avenidas y el transporte de sedimentos que éstas provocan, así como su sedimentación.
- La provisión hídrica.

Estos mismos objetivos quedan reflejados en el esquema de una restauración hidrológico-forestal (Figura 1.6) (De Simón *et al.*, 1993), que lo estructura en dos partes:

- El estudio descriptivo de la cuenca hidrográfica, que incluye el estudio del relieve, la red de drenaje, la vegetación y el suelo, y queda fijado en la parte izquierda del esquema.
- El análisis de los datos pluviométricos que culminan en la obtención de los caudales punta asociados a los distintos periodos de retorno.

Estas dos partes confluyen en un mismo punto cuando es necesario llevar a cabo actuaciones en las laderas y en los cauces de la cuenca estudiada. Y para ello el autor señala la previa ordenación agrologica de la cuenca y la selección de alternativas a desarrollar, para finalmente llegar a la descripción, justificación y cálculo de los trabajos que conforman el proyecto de restauración hidrológico-forestal. Por tanto, para poder establecer las bases o principios que deben regir las actuaciones correctoras englobadas dentro de lo que se denomina “restauración hidrológico-forestal de cuencas” se debe partir del fenómeno torrencial, caracterizado por precipitaciones de gran intensidad que generan crecidas violentas y súbitas, que provocan la circulación por los cauces de caudales sólidos (materiales en suspensión o acarreos), y que es consecuencia de los procesos erosivos de una cuenca (López-Cadenas, 2003).

La corrección del fenómeno torrencial se basa en la comparación entre la capacidad de arrastre del caudal y la resistencia de los materiales del lecho a ser arrastrados. La primera, denominada tensión tractiva, es función del peso específico del agua (γ), de la pendiente (I) y del radio hidráulico (Rh); y la segunda, llamada tensión límite de arrastre o tensión crítica, es función del diámetro característico de los materiales (d_{50}), de la diferencia entre el peso específico de los materiales y del agua ($\gamma_s - \gamma$), y de un coeficiente K . Si en una sección del cauce la tensión tractiva es superior a la tensión



límite de arrastre se producirán fenómenos de erosión, con lo que las actuaciones de restauración hidrológico-forestal irán encaminadas a reducir los parámetros de los que depende la tensión tractiva o a incrementar la tensión tractiva (Del Palacio, 1999; López-Cadenas, 2003).

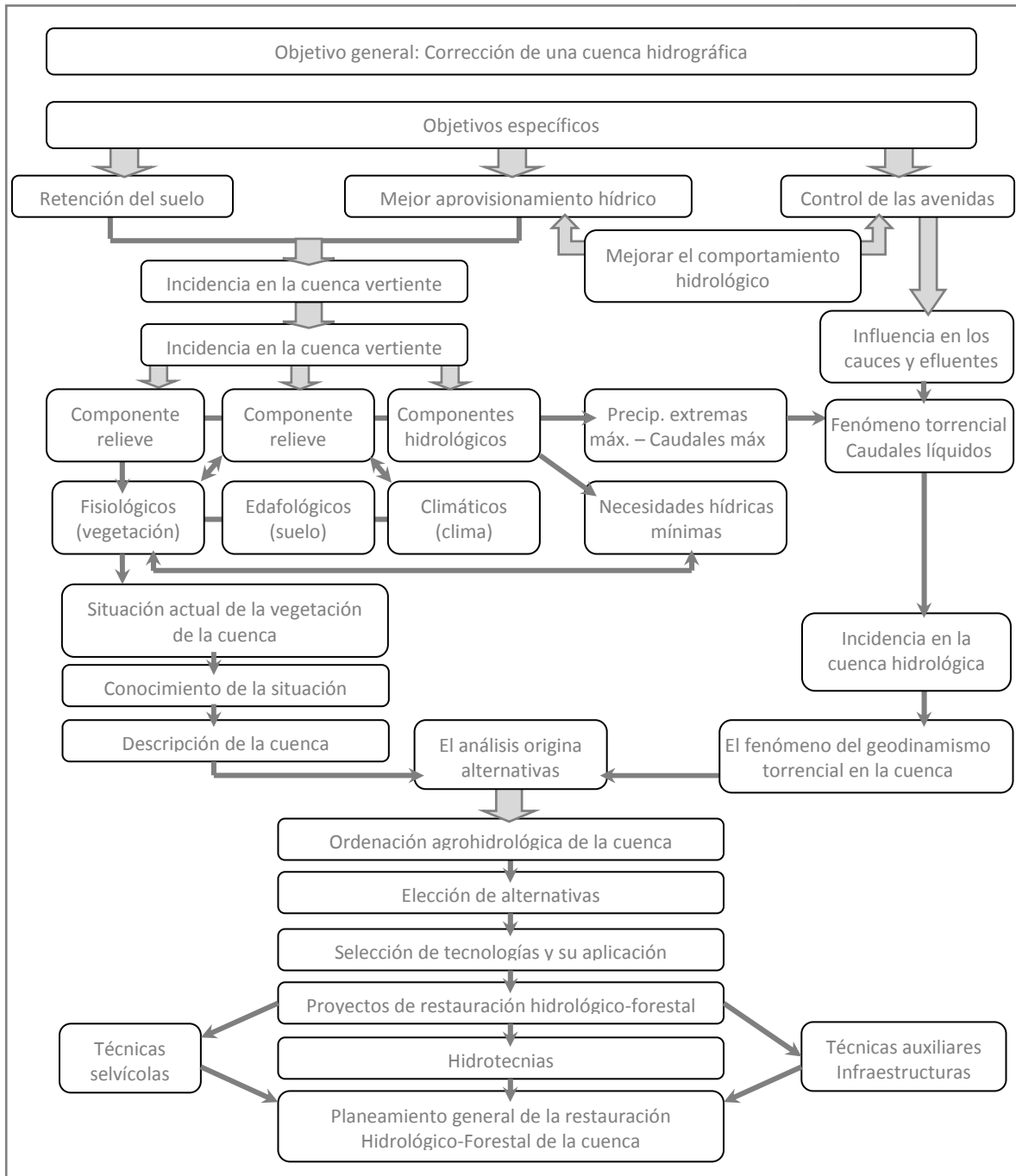


Figura 1.6. Esquema de la Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas, según De Simón *et al.* (1993)

El proceso de corrección de cauces torrenciales consiste en el establecimiento de diversas obras destinadas a la estabilización de los cauces, para regular total o parcialmente los efectos de la dinámica de los caudales circulantes, y que producen en



sus orillas y fondo procesos de erosión, transporte y sedimentación de los materiales que lo forman. Así mismo, se intenta evitar la incorporación de caudales sólidos a la corriente, actuando sobre las laderas de la cuenca vertiente (Del Palacio, 1999). En la Tabla 1.4 se muestran las actuaciones que componen la corrección de un sistema torrencial, indicando sus respectivos objetivos.

1.4.3. LAS REPOBLACIONES FORESTALES EN LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL

La restauración hidrológico-forestal de cuencas integra un conjunto de acciones de mejora de la cubierta vegetal de las laderas y obras de ingeniería hidráulica que se desarrollan en los cauces. La restauración de la vegetación es el primer paso para conseguir la restauración hidrológico-forestal de una cuenca (Rojo, 1990).

La cubierta vegetal de un lugar contribuye al control de las escorrentías directas y de la erosión superficial, estabilizando la cuenca frente al fenómeno torrencial. Por ello, la restauración de la vegetación y el mantenimiento de las cubiertas vegetales en buen estado producen (Mintegui & Robredo, 1994; Del Palacio, 1999; Soto, 2008):

- Eliminación de sedimentos en suspensión, disminuyendo la tensión tractiva de la corriente.
- Aumento de la tensión crítica de los bordes de los cauces.
- Reducción de los caudales punta circulantes.
- Disminución del radio hidráulico de las secciones y, en consecuencia, de la tensión tractiva de los caudales.

Las peculiaridades de los terrenos en los que se llevan a cabo este tipo de actuaciones repobladoras acarrea una serie de dificultades, debido a que suelen tener fuertes pendientes, climas extremados y con precipitaciones irregulares, en algunos casos escasas, y son suelos con alto grado de degradación. Estos inconvenientes generan limitaciones en cuanto a la elección de la especie, obligando a inclinarse hacia especies de temperamento heliófilo, por las fuertes insolaciones que tienen que soportar en las etapas iniciales, xerófilas y frugales. Por estas razones, las especies elegidas suelen ser del género *Pinus*. Dentro de este género, el pino carrasco (*Pinus halepensis*) ha sido ampliamente utilizado en repoblaciones en el sureste español (Maestre *et al.*, 2004). Este tipo de especies a su vez permitirán el establecimiento de especies más exigentes, como las del género *Quercus*, bien como acompañantes en la repoblación, o bien en una segunda fase de restauración hidrológico-forestal (Del Palacio, 1999).

Ejemplos del empleo de esta combinación de géneros *Pinus-Quercus* son las repoblaciones del Monte El Valle y Carrascoy en 1983, la restauración hidrológico-forestal realizada en 1907 para la corrección de la cuenca del torrente de Arás en Huesca, la realizada en 2003 para la restauración de la cuenca del Río Jarama en la Puebla de Valles en Guadalajara (Figura 1.7) , las actuaciones desarrolladas en la Rambla de la Ortigosa en la provincia de Albacete (Martínez-Casasnovas, 1992; Del Palacio, 1999; Gil, 2004; Rogríguez-Graells, 2011), o la restauración hidrológico-forestal



proyectada por el ingeniero de montes José María Ayerbe en 1930 en Saldaña, que ha conseguido frenar los procesos de acarcavamiento de las laderas, las coladas de barro y deslizamientos que afectaban a la población de Saldaña y a la carretera Saldaña-Osorno durante los episodios de intensas lluvias (Navarro *et al.*, 2014).

Tabla 1.4. Actuaciones de corrección de una cuenca torrencial (modificado de Del Palacio, 1999)

LOCALIZACIÓN		ACCIONES		OBJETIVOS	
		TIPOS			
EN LA CUENCA		Acciones biológicas	Replantación forestal Mejora de cubiertas vegetales Tratamientos selvícolas	Control de erosión laminar y en regueros Mejora de la infiltración Control de escorrentías directas	
		Prácticas de conservación de suelos	Terrazas Drenajes Zanjas de infiltración Microcuencas	Control de erosión laminar y en regueros Control de la humedad del suelo Control de los movimientos en masa Mejora de la disponibilidad hídrica en laderas	
		Obras de bioingeniería	Albarradas, palizadas Fajinas, etc. Muretes de reconstitución	Control de cárcavas Control de la erosión remontante Estabilidad de laderas	
EN EL CAUCE (RÉGIMEN TORRENCIAL)	Área de erosión y transporte	Obras transversales	Diques de consolidación	Perfil de equilibrio o compensación Consolidación de las laderas del cauce	
			Diques de retenida	De materiales sólidos	Retención de sedimentos o acarreo Defensa de embalses, vegas... Defensa de instalaciones hidroeléctricas, infraestructuras y poblaciones
				De caudales líquidos	Laminación de la onda de avenida Recarga de acuíferos
			Umbrales de fondo	Control de erosión del lecho	
			Dispositivos Clauzel Plazoletas de depósito	Retención de acarreo Retención de acarreo y bolos	
	Área de sedimentación	Obras longitudinales	Espigones	Defensa contra erosiones laterales desviando las aguas	
			Muros de defensa	Defensa de márgenes y rectificación del eje hidráulico Defensa contra inundaciones Contención de deslizamientos en laderas	
			Revestimiento de márgenes: escolleras, cubiertas vegetales, otras estabilizaciones biotécnicas (bioingeniería)	Defensa contra erosiones laterales, aumentando la resistencia de los márgenes y/o controlando la velocidad del agua	
			Canales de desagüe Encauzamientos mediante muros longitudinales, rastrillos y solera resistente a erosión	Concentración del agua en cauce fijo y estable	
			Revestimientos y espigones, deflectores	Defensa de márgenes contra erosiones laterales, recuperación de riberas	
EN EL CAUCE (RÉGIMEN FLUVIAL)		Obras longitudinales	Malecones	Defensa contra inundaciones y rectificación del eje hidráulico	



Figura 1.7. Masa artificial de pino rodeno (*Pinus pinaster*) que facilita la regeneración de los quejigos en Puebla del Valles, Guadalajara (Del Palacio, 1999)

1.4.4. LAS OBRAS CIVILES EN LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL

Para corregir y estabilizar los cauces torrenciales se pueden proyectar diversas hidrotecnias, que pueden ser longitudinales, que actúan en los márgenes del cauce, o transversales, que producen sus efectos más significativos en el lecho del cauce.

Las obras longitudinales no se pueden considerar como solución única para corregir el estado torrencial de un cauce, sino que son complementarias a las obras transversales, y su objetivo es la defensa contra la erosión lateral, contra los deslizamientos o contra las inundaciones. En la Tabla 1.5 se pueden observar las principales obras transversales, según la función que desempeñen (Del Palacio, 1999).

Por otro lado, las obras transversales ofrecen la solución más sencilla y la más empleada para la corrección de cauces torrenciales. Los principales efectos de este tipo de construcciones son (op. cit.):

- Establecen un punto fijo en el lecho del cauce, controlando su descenso progresivo.
- Provocan el depósito de los sedimentos más gruesos en el vaso de embalse antes de que se aterre.
- El aterramiento progresivo eleva el cauce hasta alcanzar la pendiente de compensación, menor que la del cauce natural.
- Generan mayores anchuras de cauce, que junto con la menor pendiente, logra una disminución de velocidad y de la capacidad de erosión.
- Producen la estabilización de las laderas, debido al aterramiento.



Tabla 1.5. Tipos de obras longitudinales (Del Palacio, 1999)

Obras de defensa contra erosiones laterales	Se aplican principalmente en los tramos de garganta y en las zonas inferiores de las ramblas donde son frecuentes erosiones laterales discontinuas en puntos concretos del cauce.	<i>Espigones</i>	Estructuras sumergibles, que se apoyan o empotran en la orilla, perpendiculares al flujo o divergentes a contracorriente. Defienden las orillas, obligando al curso de agua a seguir una curva más suave y no erosiva.
		<i>Malecones o muros de defensa</i>	De hormigón o mampostería hidráulica o gavionada, protegen directamente a las márgenes frente a erosiones laterales y regulan la sección del cauce.
		<i>Escolleras</i>	Sencillas y económicas, recubren con materiales sueltos (grandes piedras o bloques) los taludes y orillas sometidos a erosión. Puede plantarse con especies arbustivas, y hacerse de enrejados metálicos o gaviones.
Obras para la contención de deslizamientos de laderas	Normalmente se construyen muros de altura suficiente en la base de las laderas de los torrentes.		
Obras de defensa para evitar inundaciones (encauzamientos)	Consisten en la construcción de dos malecones, uno en cada orilla, para regularizar y consolidar los márgenes del cauce, definiendo una sección con capacidad de desagüe suficiente para evacuar avenidas de elevado periodo de retorno.	<i>Encauzamiento naturalizado con lecho no erosionable</i>	Empleando materiales de revestimiento de lecho y márgenes que resistan la tensión de arrastre de los máximos caudales, siendo recomendable disponer a intervalos regulares de unos rastrillos de fondo transversales.
		<i>Encauzamiento escalonado en tramos erosionables sobre lecho natural</i>	Formado por muros cajeros resistentes y pequeños diques transversales o rastrillos, que escalonan la descarga y reducen la velocidad de flujo
		<i>Encauzamiento con canal rápido y solera resistente</i>	Canales de obra de fábrica muy resistente, en las que se concilian la suficiencia de la sección con la pendiente y la rugosidad de la solera, para que no se produzcan velocidades inadmisibles

Estas obras son denominadas diques (*check dams*). Un dique se define como una estructura construida transversalmente a un cauce con la intención de mitigar y reducir la erosión del suelo (Hudson, 1982; Morgan, 1997; Chanson, 2004; Zeng *et al.*, 2009). Estas estructuras tienen como finalidad estabilizar las laderas y el lecho de cauces torrenciales, ramblas, cárcavas y barrancos a la vez que retienen el caudal sólido. Esta doble función clasifica los diques según su función principal en diques de consolidación y en diques de retención. Los diques de consolidación se utilizan para



evitar los fenómenos directos de erosión en el lecho del cauce y en las laderas marginales afectadas de inestabilidad. Con ellos se consigue la fijación del perfil longitudinal, mediante la gradación del cauce con diques consecutivos, que dotan al torrente de la pendiente más estable de los aterramientos en forma de escalones. Los diques de retención detienen caudales, ya sean sólidos (diques cerrados o de retenida selectiva) o líquidos (diques de laminación de avenidas o de recarga de acuíferos). En el siguiente apartado se expone esta tipología de diques con mayor detalle.

1.5. LOS DIQUES DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Los diques de retención, como su nombre indica, se emplean para la retención de sedimentos, tanto gruesos, que se transportan por saltación, reptación o en acarreos, como materiales que se desplazan por suspensión (Mintegui & López, 1990). Al encontrarse con este obstáculo, la velocidad de la corriente se reduce y se consigue la deposición aguas arriba de los sedimentos, que conduce a atenuar la pendiente del cauce, hecho que a su vez contribuye a la reducción de la velocidad anterior. Se trata de obras complementarias, necesarias para evitar daños por acarreos y caudales líquidos en zonas dominadas por los torrentes y ramblas y, entre los de retenida o retención, se pueden distinguir dos tipos (Del Palacio, 1999):

- Diques de retenida de materiales sólidos.- Pueden ser diques cerrados, que retienen todos los materiales, o semihuecos, que realizan una retenida selectiva, ya que sólo retienen materiales de gran tamaño.
- Diques de retención de caudales líquidos.- Incluyen los diques de laminación, cuyo objetivo es disminuir los caudales punta, y los diques de recarga de acuíferos, que tratan de embalsar agua para que se infiltre hasta el acuífero.

El empleo de este tipo de estructuras se remonta al siglo XVI, momento en el que fueron utilizados en los Alpes, y se hicieron populares en el siglo XIX. Fueron construidos en la meseta de Loess, China, en el siglo XVI, y utilizados extensamente en el siglo XX (Zeng *et al.*, 2009), de forma que se encuentran extendidos por todo el mundo: Europa, China, Japón, Indonesia, India, Canadá, Estados Unidos, etc. De esta forma, la construcción de este tipo de estructuras ha sido una técnica empleada en los planes y programas de restauración hidrológico-forestal, en particular ampliamente utilizada en España, principalmente en el sureste de la Península Ibérica (Varela, 1999; Martínez *et al.*, 2001; Martínez de Azagra *et al.*, 2002; Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b, Martínez-Lloris, 2006; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a, 2007b; Castillo *et al.*, 2008; Conesa & García, 2009; Conesa *et al.*, 2009). En estas zonas semiáridas, en las que la degradación de la cubierta vegetal y la torrencialidad de las precipitaciones originan procesos erosivos que dañan gravemente al suelo, el empleo de esta técnica es especialmente importante y necesario. Una muestra de la extensión de estos trabajos está en las labores de inventariación de diques que se han realizado en España, como por ejemplo los realizados en un pequeño sector de la cuenca del Duero por Martínez de Azagra en 2002, o en Almazora y Gadiana Sur, por Varela en el periodo 1997-99 (Conesa, 2004). Un buen resumen de las principales actuaciones de restauración hidrológico-forestal llevadas a



cabo a lo largo del siglo XX son recogidas por Del Palacio (2013): Trabajos de restauración de la cubierta en Sierra Espuña (Murcia), Sierra de Los Filabres-Baza (Almería-Granada), rincón de Ademuz (Valencia) y Turruncún (La Rioja); trabajos de corrección de torrentes en el Torrente Arás (Huesca), Cuenca alta del río Flamisell (Lleida), torrente de Senet (Lleida) y torrente Salado (Granada); trabajos de corrección de ramblas en la Cuenca del río Guadalmedina (Málaga), rambla del Cárcavo (Murcia), ramblas del río Jiloca (Teruel-Zaragoza) y rambla del Regajillo de Canales (Valencia), así como otros trabajos para la defensa de embalses, protección de infraestructuras, control de aludes, fijación de dunas, estabilización de taludes y reconstrucción de bancales llevados a cabo por todo el territorio español.

Los primeros trabajos sobre los efectos y la eficiencia de los estudios sobre el impacto de los diques de retención son poco abundantes y esclarecedores, al contrario que ocurre con las grandes presas y embalses, cuyos estudios comenzaron ya en los ochenta del siglo pasado (Chien, 1985). Las pequeñas estructuras de retención se construyen en zonas altas de los ríos, incluso sin formar parte de la red fluvial principal, si bien sus efectos pueden extender a ésta, ya que se manifiestan aguas abajo de tales estructuras. Cada vez los estudios son mayores sobre aspectos relacionados con los diques de retención (García & Puigdefábregas, 1985; Martín Rosales *et al.*, 2003; Roshani, 2003), pero su efectividad neta, su impacto global o su potencial como medida correctora crean controversia entre los resultados obtenidos (Conesa & García, 2007a), ya que son muchos los factores que influyen mientras sólo unos pocos son estudiados. Tal es la controversia que incluso algunos autores consideran que los diques de retención de sedimentos no siempre resultan necesarios ni efectivos (Marston & Dolan, 1999; Romero, 2008). García *et al.* (1996) y Götz (2001) analizan los riesgos que entrañan estas obras de corrección, sobre todo en áreas especialmente vulnerables, y Wohl (2006) indica que los diques producen los siguientes efectos negativos (Conesa, 2004; Boix-Fayos *et al.*, 2008):

- Alteran la dinámica de los sedimentos
- Alteran la estabilidad del lecho del cauce
- Interrumpe el movimiento longitudinal de nutrientes y organismos acuáticos
- Alteran el paso de los picos de inundación

Las entradas a la presa inducen importantes efectos morfológicos y granulométricos en el lecho del río (Boix-Fayos *et al.*, 2007), que cambia el comportamiento hidráulico del flujo en eventos de gran intensidad (Conesa, 2004). Por tanto, será necesario el estudio de cada caso para determinar la necesidad de su empleo para la consecución del efecto deseado, y considerar si éste se pudiera lograr únicamente con vegetación. Castillo *et al.* (2008) concluyen que, a largo plazo, los usos del suelo ejercen un mayor control de la producción de sedimentos que las obras hidráulicas, que son menos eficientes con el aumento de la cobertura vegetal. No obstante, ambas técnicas pueden alterar el régimen hidrológico del cauce y su morfología, de forma que pueden llegar a causar impactos tan negativos que lleguen a anular los efectos beneficiosos conseguidos con la ejecución de estas obras (Castillo *et al.*, 2007; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2008). Por tanto, en el corto plazo, los diques tienen efectos



positivos para el control de los sedimentos, pero debe considerarse como una medida temporal, que debe ser acompañada con actuaciones de repoblación con especies que ayuden a conseguir un control a largo plazo. De hecho, esta combinación de actuaciones tiene efectos positivos sobre la vegetación ribereña de acuerdo con Bombino *et al.* (2006), que encuentran una diversificación longitudinal de los tipos de vegetación y la creación de nuevos hábitats para las comunidades biológicas y ecológicas, que se distribuye a las características geométricas de este tipo de construcciones.

Por último hay que indicar que los diques, mediante la acción de retención de sedimentos y la conformación de sus cuñas, son la única manera de conseguir una recuperación, al menos parcial del relieve original donde se forman las cárcavas. No hay que olvidar que una cárcava es una brecha en el terreno y la superficie original del terreno viene definida a través de la cota de la arista de cabecera y las de las márgenes. Dado que el relleno total es prácticamente imposible en la mayor parte de los casos, con los diques se consigue una aproximación a la situación original previa a la formación de la cárcava.

1.5.1. TIPOS DE DIQUES DE RETENCIÓN

Podemos clasificar los diques de retención en función de su duración en permanentes y temporales (Conesa, 2004; Conesa & García, 2007a):

1.5.1.1. Diques de retención permanentes

En la Tabla 1.6 se muestran los tipos de diques de retención permanentes.

Tabla 1.6. Tipos de diques de retención permanentes (basado en Conesa, 2004)

En función de la capacidad de evacuación de caudales	Aliviadero sobre la presa
	Aliviadero separado de la presa
En función de su resistencia al empuje del agua	Dique de gravedad
	Dique en arco
	Dique mixto
En función del material	Dique de mampostería gavionada
	Dique de mampostería hidráulica y de hormigón
	Dique de materiales naturales
	Dique de travesaños y de pantalla
	Dique abierto

Desde el punto de vista hidráulico, su diseño debe responder a dos funcionalidades básicas, que son evacuar los caudales que no son retenidos y resistir el empuje de los



acarreo. Al hablar de evacuación nos referimos al aliviadero, que puede situarse sobre la estructura o con independencia de ella. Y en cuanto a la resistencia del empuje del agua se distinguen diques de gravedad, en arco y mixto. En los diques de gravedad el empuje es transmitido a su base y resiste por su gran peso, mientras que en los diques en arco se transmite el empuje al terreno gracias a la curvatura horizontal y a la doble curvatura (bóvedas o cúpulas). Como tipos mixtos se encuentran los diques de bóvedas múltiples y los de arco-gravedad, en los que parte del empuje lo resiste la curvatura y parte el propio dique gracias a su peso.

El material empleado para la construcción de los diques de retención puede ser variado, como se indicó anteriormente, distinguiendo los siguientes tipos:

- **Diques de mampostería gavionada:** constituidos por recipientes con forma de paralelepípedo, asemejando una jaula, llamados gaviones y construidos con una malla metálica de alambre galvanizado (en ocasiones incluso recubierta de plástico) de forma hexagonal. Estas mallas se enlazan entre sí mediante una triple torsión (Mintegui & López, 1990). El gavión que viene plegado de la fábrica se despliega en el lugar de emplazamiento y una vez tensado se rellena de piedras y se cierran mediante un cosido de la tapa con un alambre (op. cit.). Estos cestos se colocan uno encima de otro, de la misma forma que en las presas de ladrillos, hasta conseguir la estructura deseada (Figura 1.8). Además es habitual disponerlos de un filtro para evitar su hundimiento y la pérdida del sustrato. Es el peso de estas estructuras el que actúa contra las fuerzas hidrostáticas y otras fuerzas activas, y gracias a su flexibilidad y capacidad de adaptación al lecho el dique permanece estable (Conesa & García, 2007a). Martín-Vide (2002) señala que las dimensiones típicas y estandarizadas de los gaviones son 4 metros de largo por 1 metro de ancho, y distingue entre tres tipos de gaviones en función de su altura:
 - o Gaviones de cuerpo: son los más comunes, de 1 metro de altura.
 - o Gaviones de base: su altura se reduce a 0,5 metros.
 - o Gaviones de revestimiento o corazas: son los más pequeños, con una altura de 0,20 ó 0,30 metros.

Las ventajas de los gaviones frente al resto de estructuras son (Hudson, 1982):

- o Su flexibilidad para adaptarse a las características del terreno que no poseen las estructuras rígidas.
- o No se ven gravemente afectados con los movimientos de suelo, como la expansión y la retracción, debido a su flexibilidad, posibilidad de pandeo y torsión. Además, avisan de posibles tubificaciones o descalces.
- o No se derrumban fácilmente, frente a los ladrillos o el hormigón que resisten menos a flexión, tracción, torsión y pandeo.
- o Son permeables, por lo cual retiene parte de los sedimentos y los clasifica (aunque las arcillas es difícil que las decante), y a la vez permiten el paso del flujo de agua cuando se ven sometidos a grandes avenidas.



Figura 1.8. Dique de mampostería gavionada en Tórtoles (Ávila)

- **Diques de mampostería hidráulica y de hormigón:** Suelen constar de un cuerpo central con forma trapezoidal, de talud vertical aguas arriba y talud inclinado aguas abajo, y dos alas, si bien pueden tener otras formas (Figura 1.9). Son muy rígidos y causan un impacto ambiental significativo desde el comienzo de su construcción.

Figura 1.9. Dique de hormigón en la Sierra de los Filabres (Bellín *et al.*, 2011)

- **Diques de materiales naturales:** diques de piedras sueltas, de madera o de piedras con madera. Tienen la ventaja de integrarse mejor en el paisaje causando un menor impacto. Los diques de piedras sueltas son los de menor coste, y tienen una capacidad para adaptarse al lecho mejor que los diques rígidos de cemento y hormigón; suelen instalarse en cauces pequeños en tramos altos de la cuenca y no superan los 2 metros de altura. Los diques de madera están formados por troncos que se anclan con clavos y estribos, reteniendo el material de transporte en cauces menores (Figura 1.10); pueden tener un efecto negativo en un suceso de gran intensidad, formando parte de los acarrees (Ziemer, 1981; Cantero, 2011). Los diques mixtos de madera y piedras forman una estructura organizada de menos de 2 metros de altura que se suele emplear en zonas de montaña, de pequeñas corrientes y pendientes empinadas.



Figura 1.10. Diques de madera en la República Checa (Mongil, 2014a)

- **Diques de travesaños y de pantalla:** Son utilizados cuando los aportes son mayores y las corrientes más intensas para retener el material vegetal que pudiera obstruir el canal aguas abajo.
- **Diques abiertos:** Son la solución para controlar el transporte de sedimentos sin interrumpir el paso a la fauna acuática, empleados en zonas con gran aporte de material grueso. También se usan en zonas de nieve para evitar avalanchas pero permitir la fusión de la nieve. Un ejemplo de este tipo de dique se muestra en la Figura 1.11.



Figura 1.11. Dique abierto en el río Forchia (Italia)



1.5.1.2. Diques de retención temporales

Su función es reducir la velocidad de la corriente en eventos torrenciales, pero no retener sedimentos dada su baja capacidad. Se construyen en cunetas, pequeñas vaguadas o barranqueras, a partir de piedras, troncos o balas de paja, que pueden cubrirse por una malla geotextil. Conseguida la estabilización del lugar (laderas o *talweg*) con técnicas de bioingeniería, son desmantelados, de donde se deduce su carácter temporal. Las balas de paja u otro tipo de materiales, como sacos de arena y fajinas, deben emplearse como medida temporal, ya que se pudren y/o pueden destruirse en una tormenta, de forma que todo el material retenido pasa a formar parte de los acarreos. Tan sólo se utilizarán de forma permanente en zonas donde la fitoestabilización esté asegurada, lo cual es menos probable en zonas áridas y semiáridas (Conesa, 2004).

1.5.2. FUNCIONES DE LOS DIQUES DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Las funciones que cumplen estas estructuras transversales y que justifican su empleo son múltiples, y han sido reseñadas por varios autores. A continuación se explica cada una de ellas, estando en muchos casos relacionadas unas con otras:

- Estabilizar las laderas y cauces torrenciales, como barranqueras, barrancos, torrentes, ramblizos o cárcavas. Consolida las laderas inestables gracias a la cuña de materiales aguas arriba del dique, que se interpone entre las dos laderas, impidiendo los movimientos en masa: deslizamientos de fondo, socavación o hundimientos (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007a; Romero, 2008). El motivo es que la cuña sirve de apoyo fijo, que evita la erosión por debajo del plano del aterramiento estabilizado, y que las propias laderas, al erosionarse y derribarse se quedarán paralizadas a su pie, remontándose sobre ellas hasta alcanzar el nuevo plano del terraplén natural de equilibrio, consiguiendo anular sensiblemente, en el intervalo de influencia, la aportación lateral más directa de sólidos al cauce (MAGRAMA, 2013). Los diques que cumplen específicamente esta función son los denominados diques de consolidación, que son poco empleados, si bien los diques de retención, mucho más numerosos, consiguen este efecto. Esto es porque para que exista consolidación y estabilización de laderas es necesario un relleno previo del vaso del dique, así como una estabilización del lecho desarrollado en su base y un correcto diseño de la obra (Conesa & García, 2007a).
- Laminar las avenidas (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007a), disminuyendo el caudal punta: Los diques construidos en cauces efímeros tienen normalmente esta función, especialmente importante en zonas mediterráneas, consiguiendo desviar parte del agua a los campos de cultivo circundantes y/o reducir la velocidad del flujo, con lo que aumenta la capacidad de infiltración así como la recarga de acuíferos. Un ejemplo de este tipo de diques es el construido en El Llevant (Mallorca) (Figura 1.12), que dispone de una gran tronera de fondo de dos metros de diámetro, o los pequeños sistemas

de represas escalonadas que permiten regular las crecientes en épocas de aportes extraordinarios en la cuenca hidrográfica que comprende la zona norte de Argüello, este de Saldán, Villa Allende, Unquillo y sur de Río Ceballos (Quintana & Barbeito, 2004).

- Aumentar la tasa de infiltración y recargar los acuíferos, favorecido por el almacenamiento de agua en el vaso y el aumento de la carga hidrostática (Pulido *et al.*, 1992; Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007a): A la vez que se retienen sedimentos consiguen la saturación de agua aguas arriba del dique, e incluso aguas abajo en aquellos casos en los que la erosión local haya creado una poza. Al aumentar el tiempo de infiltración se ve favorecida la recarga de acuíferos. Esta función es especialmente importante en zonas de terrenos permeables, y donde la infiltración constituye una importante aportación de recursos hídricos. Un ejemplo son las presas del Algar y Belcaire, en la cuenca del Júcar, que actúan como diques de retención con la función principal de recargar acuíferos (Figura 1.13).



Figura 1.12. Dique de laminación de caudales líquidos en El Llevant (Mallorca) (Foto: Martínez, A. (MAGRAMA, 2013))



Figura 1.13. Presa del Algar (Valencia) diseñada para la recarga del acuífero (Foto: www.ohl.es)

En este sentido debemos hablar de los diques de retención subterráneos que se construyen en el norte de África para evitar que las aguas subálveas se derramen al llegar al nivel freático. Para su construcción se excavan unas zanjas hasta llegar a la capa impermeable y se rellenan con arcilla u otro material impermeable, o bien se forma una barrera de piedra o ladrillos. Adicionalmente se pueden construir presas de arena de 1 o 2 metros de altura que retengan los caudales sólidos y aumenten la capacidad de almacenaje y de infiltración (FAO, 1995). Esta técnica ha sido empleada en algunas regiones de Kenia (Figuras 1.14 y 1.15) (Ersten *et al.*, 2007).



Figura 1.14. Dique subsuperficial en Kitui (Kenia) (Foto: TRAGSATEC)



Figura 1.15. Dique de arena durante y después de una tormenta en Kenia (Ersten *et al.*, 2007)

Sin embargo, en algunos casos, los diques de retención pueden no favorecer la recarga de acuíferos, como el caso planteado por Toniutti (2004), en el que las medidas llevadas a cabo para estabilizar el régimen de caudales y sedimentos (estabilización del lecho a través de traviesas artificiales, construcción de diques de retención y reducción de la anchura del cauce) pueden reducir la permeabilidad de los materiales aluviales, produciendo efectos negativos en los acuíferos de la llanura Friuliana (Italia).



- Reducir la pendiente del lecho (Conesa & García, 2007a; MAGRAMA, 2013). La deposición de sedimentos va conformando el aterramiento del dique, reduciendo progresivamente su pendiente hasta alcanzar la pendiente de compensación, que se forma cuando la composición granulométrica de los arrastres del lecho y corriente se iguala, compensándose los volúmenes sólidos que entran y salen del aterramiento.
- Gracias a la cuña de sedimentos formada tras ellos forman una superficie estable, de pendiente mucho más reducida, que puede ser apta para plantaciones que pueden conformarse como tierras de cultivo fértiles (Xu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2013). Así, en la meseta de Loess (China), en donde hay más de 100.000 diques construidos y se sufren grandes pérdidas de cultivos debido a las tormentas, se emplean para crear tierras de cultivo de alto rendimiento y de huertos con suelo fértil enriquecido y que posee agua suficiente gracias al efecto de retención que consiguen, tanto de sedimentos como de agua y nutrientes (Xu *et al.*, 2004). Este sistema es empleado por los chinos desde hace siglos, denominándose *dam lands* o *terrace farmlands*. En concreto, en 2002 había 113.500 diques construidos en la Meseta de Loess, gracias a los cuales se crearon 3.200 km² de tierras de cultivo con alta productividad y se interceptaron un total de 700 millones de m³ de sedimentos que hubieran vertido en el río Yellow (op. cit.). En esta región, que posee un clima árido o semiárido y con poca humedad, estas estructuras han conseguido crear un nuevo tipo de agricultura. De acuerdo con Li (1995) estas tierras de cultivo formadas tras los diques se encuentran enriquecidas en nitrógeno, fósforo y sustancias orgánicas, y la cantidad de agua retenida es dos o tres veces superior con respecto a las laderas o zonas en pendiente. Algunos datos son: Entre 750 y 1.500 kg de maíz es cosechado por hectárea en tierras de cultivo formadas por diques en la provincia de Shanxi (Fang, 1999). En 2004 las *dam farmland* ocupaban el 9% de la superficie de la Región Loess Hill Ravine, pero su rendimiento de grano era un 23,5% superior que el de cualquier otro cultivo (Xu & Wang, 2000). Tan importante se ha convertido esta estructura para la formación de tierras de cultivo que incluso hay un proverbio chino que dice *One would rather own a hectare of dam farmland than ten hectares of slope farmland*, es decir “Más vale tener una sola hectárea de tierras de cultivo de diques que diez en tierras de cultivo en pendiente” (Xu *et al.*, 2004).
- Disminuir la velocidad del agua y por tanto su capacidad erosiva (Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Romero, 2008; MAGRAMA, 2013). En este tipo de estructuras, mientras el vaso no esté completamente aterrado, el efecto presa consigue frenar la velocidad de los sedimentos, de forma que si hay agua embalsada se depositan los más gruesos y disminuye la proporción sólida del caudal de vertido. Además, la deposición de sedimentos eleva el cauce en el entorno que comprende el aterramiento; este nuevo lecho, elevado y asentado sobre los sedimentos retenidos ha aumentado su anchura a lo largo de toda su sección, por lo que los caudales circularán por perfiles de amplia base, consiguiendo una disminución del radio hidráulico igual, sensiblemente, a la del



calado de las aguas. Con este proceso se consigue una menor pendiente del aterramiento, así como una disminución de la velocidad de los acarreo y por tanto de su capacidad de arrastre y erosión.

- Retrasar el aterramiento de embalses y alargar su vida útil, al reducir la tasa de materiales que serían vertidos en el vaso del embalse (Gil, 2004; Belmonte *et al.*, 2005b; Romero, 2008). Este aspecto es especialmente importante en España, ya que es el país europeo con mayor número de embalses, y 4º del mundo, después de China, India y Estados Unidos, poseyendo el 2,5% de las presas de todo el mundo y regulando más del 40% de los recursos hídricos globales (Vericat & Batalla, 2004; Conesa & García, 2007a; Romero, 2008). Los embalses se encargan de regular estos recursos (caudales líquidos) pero no los aportes sólidos, que son obligados a quedarse retenidos, produciendo una reducción de la capacidad de estas estructuras. Almorox *et al.* (1994) indican valores de pérdida de capacidad de almacenamiento en torno al 16,8% para embalses construidos 30-50 años antes de su estudio y del 27% para los más antiguos, y Avendaño *et al.* (1997a) estimaron una pérdida de capacidad de los embalses de las cuencas hidrográficas mediterráneas y del Guadalquivir de entre el 5 y el 25 %. De acuerdo con los datos aportados por Avendaño *et al.* (1997a), que determinaron una tasa media anual de reducción de capacidad del 0,3%, la esperanza de vida media de los embalses españoles es de 250 años desde la fecha de su construcción (Conesa & García, 2007a). En la Tabla 1.7 se indica un resumen de las campañas batimétricas realizadas en embalses españoles (Conesa & García, 2007a).

Tabla 1.7. Resumen de las campañas batimétricas realizadas en una serie de embalses de las cuencas españolas (Conesa & García, 2007a)

Cuenca	Embalses estudiados	Capacidad inicial (hm ³)	Capacidad actual (hm ³)	Pérdida (hm ³)	Pérdida de vol. inicial (%)	Periodo medio (años)	Pérdida de capacidad media anual (%)
Norte I	6	517	499	18	3	31	0,11
Norte II	3	314	256	58	18	33	0,56
Norte III	2	64	62	2	3	36	0,10
Duero	5	899	875	24	3	34	0,08
Tajo	12	3.970	3.892	77	2	28	0,07
Guadiana I	5	2.082	1.932	150	7	29	0,25
Guadalquivir	22	3.706	3.581	124	3	24	0,12
Sur	6	558	544	15	3	24	0,11
Segura	12	951	855	95	10	49	0,20
Júcar	16	1.474	1.420	55	4	30	0,12
Ebro	17	3.075	2.805	271	9	35	0,25
C.I. Cataluña	4	211	199	12	6	36	0,16
Total	110	17.321	16.921	901	5	31	0,16



Para evitar la colmatación de embalses son necesarias medidas preventivas y correctoras. Las primeras pasan por actuar sobre los puntos calientes de generación de sedimentos para reducirlos y evitar su movilización, así como un diseño adecuado de la obra para evitar su entrada. Conesa & García (2007a) indican que una restauración forestal adecuada es muy útil como medida de prevención, si bien para retardar la colmatación de estas estructuras en la fase de recuperación o de repoblación, la construcción de diques de retención que ayuden a la estabilización de cauces y laderas es una estrategia aconsejable. Sin embargo, las medidas correctoras suelen ser puntuales, y no ayudan a mantener una situación adecuada permanente en el tiempo: remoción total o parcial de presas y azudes, vaciado de embalses, extracción de sedimentos del vaso y gestión del nivel de embalse y de crecidas (op. cit.).

- Controlar el transporte de sedimentos, en condiciones generales así como en aquellos casos en que se encuentren asociados con el flujo de escombros y carga pesada durante las grandes inundaciones (Catella *et al.*, 2005). Esto es gracias a que capturan, controlan, retienen y disminuyen el aporte de material sólido (Conesa, 2004; Belmonte *et al.*, 2005; Conesa & García, 2007a; Romero, 2008). De esta forma, reducen la peligrosidad derivada de eventos torrenciales de gran intensidad, y las consecuentes pérdidas y daños, tanto materiales como humanos. Además, controlan aludes, mediante su retención completa o parcial, evitando que se vean afectadas vías de comunicación, poblaciones o estaciones de esquí (Gil, 2004).

1.5.3. EFECTOS DE LOS DIQUES DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Rice *et al.* (1979) señalan que la tasa de erosión está directamente relacionada con la cantidad de sedimentos y con su tamaño, así como con la capacidad de transporte, de forma que si el suministro de sedimentos es inferior a la energía de transporte se produce la erosión del cauce, pero si el suministro de sedimentos es mayor que ésta se produce la deposición y por tanto una acreción sedimentaria. En cauces con grandes pendientes, sin embargo, no es la energía de transporte si no la resistencia del lecho a la erosión lo que influye en una mayor o menor erosión. Es por ello que el aporte de partículas mayores a las que componen el lecho es una medida empleada para reducir la erosión (Conesa & García, 2007a). Beschta (1979) indica que la incorporación de derrubios en el cauce consigue una reducción de la pendiente, creando un cauce escalonado que consigue una pérdida de energía de transporte, función especialmente importante en cauces torrenciales. Esta misma función la cumplen diques de retención construidos en el cauce formando un perfil longitudinal escalonado, aunque en cauces de gran pendiente los diques deben situarse próximos entre sí, convirtiéndose en una práctica cara (Ziemer, 1981).

Los diques empleados en los proyectos de restauración hidrológico-forestal pueden producir diversos efectos: hidrológicos, geomorfológicos, efectos sobre infraestructuras, etc., que han sido señalados por multitud de autores (Chien, 1985; López-Cadenas, 1988; Castillo *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil,



2004). Estos efectos difieren aguas arriba y aguas abajo de estas estructuras, si bien algunos pueden considerarse de forma conjunta.

1.5.3.1. Efectos aguas arriba de los diques de retención

Aguas arriba se produce la acumulación de sedimentos de forma gradual al aumentar el nivel de base local (García & Puigdefábregas, 1985). Esta acumulación consigue el relleno del vaso que conforman los diques de retención, y es especialmente rápida en aquellos medios en los que la producción de sedimentos es elevada, como es el caso de las zonas áridas y semiáridas (Poesen & Hooke, 1997, Conesa & García, 2007a).

En cuanto al comportamiento hidráulico de la corriente, aguas arriba, estas estructuras provocan un descenso de la energía cinética del flujo de agua y de su capacidad de transporte, que induce la deposición de los sedimentos, produciéndose un cambio local del perfil del río, con disminución de la pendiente y ensanchamiento de la sección, y con un progresivo aterramiento del vaso con enterramiento de barras antiguas, con la consecuente elevación del lecho del cauce. De esta forma, producen una estabilización del canal, y originan dispersión de canales, e incluso un almacenamiento de agua, transitoriamente, de forma que se reducen los caudales punta; o de forma permanente, favoreciendo la recarga de acuíferos (García & Puigdefábregas, 1985; Castillo *et al.*, 2001; Gil, 2004; Castillo *et al.*, 2007). Al disminuir la pendiente, además, en el extremo del área de influencia de la presa, se produce una deposición caótica de cantos heterométricos. En esta deposición, los sedimentos se organizan por tamaños, tendiendo a la simplificación sedimentaria que se va prolongando hacia arriba (García & Puigdefábregas, 1985).

1.5.3.2. Efectos aguas abajo de los diques de retención

Aguas abajo los efectos de estas hidrotecnias son más complejos. La retención de sedimentos aguas arriba de la estructura provoca que el flujo recupere parte de su energía cinética original, que ya no la emplea en arrastrar sedimentos, por lo que tiene una gran capacidad de incisión y una mayor capacidad erosiva cuando el terreno aguas abajo está desprotegido. Por ello se puede producir la excavación del nivel de base, lo cual induce un incremento y una reactivación de los procesos de erosión (García & Puigdefábregas, 1985; Bull *et al.*, 2000; Castillo *et al.*, 2001). Además, se produce una modificación de la morfología de los cauces (García & Puigdefábregas, 1985; Romero *et al.*, 2003). Estos cambios morfológicos son un índice de que la erosión se ve incrementada aguas abajo del dique, produciendo cambios en el transporte y la descarga de sedimentos. Y en función de la intensidad de esta descarga, puede alterarse la forma de la sección transversal, del cauce, la pendiente y el tamaño de grano del material del lecho (Brandt, 2000; Castillo *et al.*, 2007). Sin embargo, esta erosión a la que se refieren los autores señalados, es posible que sea debida a un defecto en el diseño de la estructura, en cuanto a la falta de disipadores de energía, cuencos de amortiguación o zampeados, y no a causa del flujo hidráulico. Si pensamos en zonas de fuerte pendiente con una buena protección vegetal, la falta de sedimentos



en la escorrentía no induce socavaciones del lecho. Sólo ocurre cuando desaparece la vegetación en laderas y riberas, situación en la cual se inician los procesos erosivos.

Sobre las infraestructuras, aparte de ocasionar una prolongación de la vida útil de los embalses, sirven de defensa de puentes, drenajes y encauzamientos desde una doble perspectiva: los diques situados aguas arriba de estas infraestructuras ayudan a mantener su operatividad para el rango de caudales para el que fueron diseñados, ya que, al provocar la sedimentación, evitan la acumulación de materiales arrastrados por el flujo, que producirían la reducción de la sección efectiva del canal; los diques situados aguas abajo, sin embargo, evitan que se descalce la cimentación de estas obras, gracias al aterramiento del vaso que producen (Gil, 2004). Cuando los diques tienen grandes dimensiones detendrán gran cantidad de sedimentos, de forma que en caso de una gran avenida, si se produce la rotura de la estructura, habrá gran cantidad de sedimentos disponibles para su transporte, con la peligrosidad que ello conlleva. Por este motivo, en ocasiones, si su situación lo permite, las presas son vaciadas de sedimentos, o bien se construyen de materiales más resistentes (cemento u hormigón) (Conesa & García, 2007a).

Por otra parte, Gil (2004) indica que los diques alteran la geomorfología de barrancos, torrentes y ramblas, por lo que a la hora de diseñarlas es necesario tener en cuenta estos efectos para que los efectos negativos sean los mínimos posibles. No obstante, hay que considerar la distinta repercusión de estas hidrotecnias en corrientes naturales y en zona de *badlands* o torrentes generados por una acción antrópica descontrolada. En este último caso, los diques intentan recuperar una morfología más parecida a la original antes de la intervención humana y al menos, si no es posible, disminuir la capacidad erosiva de los flujos torrenciales creados y reducir el elevado transporte de sedimentos, con lo que sus efectos serían positivos. Además, si se construyen estas hidrotecnias sobre flujos casi permanentes, se debe tener en cuenta a la fauna que utiliza el cauce, y por lo tanto adoptar las medidas oportunas para que no se vea afectada, sobre todo cuando se dispongan escalas piscícolas, especialmente en las presas, y sobre todo considerando que en España existen 1401 grandes presas construidas.

Por último, los efectos de la retención de sedimentos y laminación de avenidas anteriormente señalados, conducen a una reducción de los riesgos de inundación de los núcleos de población que se sitúan aguas abajo de estas estructuras, de acuerdo con Gil (2004). Sin embargo, en ocasiones inducen una falsa idea de seguridad absoluta y se producen urbanizaciones o usos de los vasos o lechos de deyección por actuaciones urbanas, como en el caso del torrente de Arás (Biescas), la existencia de construcciones al pie de las cárcavas en Saldaña (Palencia), o en la zona de estudio, la construcción de una casa apoyada en un dique en Tórtoles (Figura 1.16).



Figura 1.16. Arriba: Construcción empotrada en un dique de gaviones en Tórtolas. Abajo: Vivienda construida al pie de una cárcava en Saldaña.

1.5.4. EFECTOS DE LOS SEDIMENTOS SOBRE LA FAUNA PISCÍCOLA

Si no se llevan a cabo medidas de retención de sedimentos, estas partículas llegan a los cursos de agua ubicados aguas abajo de las zonas de erosión, con sus consecuentes efectos sobre la ictiofauna. Los efectos de los sólidos en suspensión sobre la fauna piscícola han sido muy estudiados debido, principalmente, a la importancia económica de este recurso natural (Wood & Armitage, 1997).

De acuerdo con Bilotta & Brazier (2008) el efecto sobre los ecosistemas dependerá de los siguientes factores:



- la concentración de sedimento fino en suspensión
- la duración de la exposición a los sedimentos finos
- su composición química
- el tamaño de las partículas

Wood & Armitage (1997) indican, de forma general, que existen al menos cinco formas de que las altas concentraciones de sedimentos finos afecten negativamente a los peces:

- En primer lugar, afectan negativamente sobre el movimiento de los peces en el agua, pero también reducen su tasa de crecimiento y su tolerancia a la enfermedad; si se encuentran presentes en concentraciones elevadas podrían causar la muerte por obstrucción de sus branquias y filamentos branquiales (Bruton, 1985).
- Influyen negativamente sobre los huevos de peces, larvas y juveniles; todas estas etapas parecen ser más susceptibles a los sólidos en suspensión que los peces adultos (Chapman, 1988; Moring, 1982).
- Modifican los patrones de migración de los peces (Alabaster & Lloyd, 1980).
- Reducen el alimento disponible, causado por una menor penetración de la luz y como resultado reduce el hábitat disponible para las presas de insectívoros (Bruton, 1985; Doeg & Koehn, 1994; Gray & Ward, 1982).
- Afectan sobre la eficiencia de la captura, particularmente en el caso de especies alimentadoras visuales (Bruton, 1985; Ryan, 1991).

Estudios experimentales demuestran que la concentración de finos es un factor crítico en el desarrollo embrionario de los salmónidos (Wood & Armitage, 1997). Un aumento en el volumen de sedimentos finos puede reducir la supervivencia de los huevos, un incremento del número de alevines prematuros y un aumento de los depredadores (Olsson & Petersen, 1986; Reiser & White, 1990, Wood & Armitage, 1997).

La sedimentación de partículas finas (tamaño de partícula inferior a 4 mm) es la mayor causa de degradación de las condiciones ecológicas naturales de los ríos (Cordone & Kelley, 1961; Hynes, 1970; Hogg & Norris, 1991; Wood & Armitage, 1997; Harrison *et al.*; 2007). Los sólidos en suspensión tienen potencialidad para generar impactos negativos sobre las características físicas, químicas y biológicas del medio ambiente: impacto sobre la calidad de las aguas, impactos por suspensión y distribución de sedimentos contaminados, impactos sobre los peces, flora y otros organismos vivos e impactos por cambios físicos del fondo acuático (Landaeta, 1995).

En cuanto al efecto de los sólidos en suspensión sobre la calidad de las aguas, pueden generar cambios tanto físicos como químicos. Entre los cambios físicos, el más importante es la turbidez (Goodwin & Michaelis, 1984), generada por los sedimentos finos, tales como arcillas y limos, que permanecen en suspensión siendo transportados por las corrientes cubriendo extensas áreas. Además, estos sedimentos finos limitan la penetración de la luz y reducen la productividad primaria, afectando, por tanto, al resto de la cadena alimenticia (Van Nieuwenhuysse & LaPerriere, 1986; Davies *et al.*,



1992; Wood & Armitage, 1997; Reid & Anderson, 1999). Los altos niveles de turbidez, que a su vez provocan cambios de temperatura, o las variaciones en los contenidos de sal pueden no ser tolerados por muchas especies (Landaeta, 1995). En casos extremos, los sedimentos finos pueden producir cambios en la morfología del cauce (Nuttall, 1972; Wright & Berrie, 1987; Doeg & Koehn, 1994; Wood & Armitage, 1997), producir la muerte de la flora acuática (Brookes, 1986; Edwards, 1969; Wood & Armitage, 1997) y reducir el hábitat disponible para los organismos bentónicos (Petts, 1984; Richards & Bacon, 1994; Schälchi, 1992; Wood & Armitage, 1997). Entre los cambios químicos destaca la demanda de oxígeno, el aumento de nutrientes (un aumento en la cantidad de nutrientes favorece un aumento en el número de especies, lo cual influye en una mayor demanda de oxígeno), la presencia de trazas de metales pesados y pesticidas y la modificación de los niveles de salinidad (Landaeta, 1995).

Por otra parte, el agua es un buen vehículo de transporte y distribución de contaminantes. Si las aguas poseen sedimentos en suspensión el transporte de contaminantes se ve favorecido debido a que las partículas de limos y arcillas con cargas negativas tienen a absorber los contaminantes, tales como pesticidas y metales pesados (Landaeta, 1995).

Además, la deposición de sedimentos tiene influencia sobre el hábitat de la flora acuática, del macrobentos y de los peces, ya que rellenan los huecos intersticiales del sustrato, reduciendo el flujo de agua que lo atraviesa, perdiendo el oxígeno disuelto que ocupaba estos poros y reduciendo el hábitat disponible para los organismos bentónicos (Coats *et al.*, 1985; Doeg & Koehn, 1994; Waters, 1995; Wood & Armitage, 1997). Esto ocasiona bajas en la producción béntica y aumenta la mortalidad de los huevos y larvas de peces. Es decir, el exceso de sedimentos finos, ya se encuentren en suspensión o depositados en el lecho, puede tener efectos perjudiciales en todos los estadios de vida de los peces, pero puede afectar especialmente salmónidos si el cambio de cultivo coincide con el momento de la incubación de huevos, como ocurre en Reino Unido (Collins & Walling, 2007; Collins *et al.*, 2008).

No obstante, el aporte de sedimentos afectará a un río en mayor o menor medida en función de su capacidad de transporte de la siguiente manera (Gómez & Segura, 2007):

- Si el volumen de sedimentos es inferior a la capacidad de transporte del río los sedimentos formarán el relleno en zonas de remanso y en pozas.
- Si el volumen de sedimentos es superior a la capacidad de transporte del río, de forma que se produce una sedimentación uniforme en el lecho, el río responderá aumentando su anchura para recuperar su capacidad de desagüe.

Las principales actividades antropogénicas que provocan un aumento del aporte de sedimentos a los cursos de agua son:

- Los cambios en las prácticas agrícolas, como el aumento de tierras de cultivo, lo que conlleva mayores áreas de suelo desnudo expuesto, susceptibles a la erosión por la lluvia (Greig, *et al.*, 2005), y las prácticas agrícolas mecanizadas que compactan el suelo y aumentan la escorrentía y la erosión del suelo (McMellin *et al.*, 2002; Bilotta, *et al.*, 2007). Owens *et al.* (2000) descubrieron



gracias a la identificación de huellas digitales de sedimentos que el 61% de la carga de sedimentos del río Tweed, en Escocia, provenía de suelos dedicados a cultivos y pastos.

- La intensificación de las prácticas agrícolas derivadas del aumento de la densidad de población (Heaney *et al.*, 2001).
- Aumento de la erosión de las orillas debido a la pérdida de la hidrodinámica natural.

Es por ello que los efectos son especialmente graves en cuencas con grandes superficies agrícolas, y la situación empeora si se suceden eventos torrenciales. Para reducirlos es muy importante llevar a cabo medidas que reduzcan los problemas de erosión, tales como laboreo de conservación, siembra directa, cultivo en fajas, cultivo en curvas de nivel o evitar la quema de rastrojos (Gómez & Segura, 2007), además de las comentadas en los apartados anteriores. En este sentido, el Real Decreto 486/2009, de 3 de abril, por el que se establecen los requisitos legales de gestión y las buenas condiciones agrarias y medioambientales que deben cumplir los agricultores que reciban pagos directos en el marco de la política agrícola común, los beneficiarios de determinadas ayudas de desarrollo rural, y los agricultores que reciban ayudas en virtud de los programas de apoyo a la reestructuración y reconversión y a la prima por arranque del viñedo, incluye en su Anexo II las siguientes normas exigibles para evitar la erosión:

- Cobertura mínima del suelo: establece las condiciones para la siembra de cultivos herbáceos y leñosos, prohibiendo arrancar pies en zonas de pendiente igual o superior al 15%. En el caso de las tierras de barbecho y de retirada, propone la realización de alguna de las siguientes prácticas: las tradicionales de cultivo, las de mínimo laboreo o el mantenimiento de una cubierta vegetal adecuada, bien sea espontánea bien mediante la siembra de especies mejorantes.
- Ordenación mínima de la tierra que respete las condiciones específicas del lugar, en la que se incluye el laboreo adaptado a las condiciones de la pendiente y de forma que la implantación del cultivo se haga lo más rápidamente posible, para evitar que el suelo pueda verse afectado por la erosión. En aquellas zonas con elevado riesgo de erosión se deberán respetar las restricciones que establezca la Administración competente para evitar la degradación y la pérdida de suelo.
- Terrazas de retención: deberán mantenerse en buen estado de conservación, con su capacidad de drenaje, evitando los aterramientos y derrumbamientos y, en cualquier caso, la aparición de cárcavas.

1.6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA EROSIÓN RETENIDA POR DIQUES FORESTALES

Los diques son una fuente de información muy importante de la tasa de erosión de sedimentos, ya que los retienen desde el momento de su construcción. Es por ello que la medición de la cuña de sedimentación de cada dique es fundamental para conocer la erosión en la zona de estudio. En la bibliografía revisada se encuentran varias



formas, aportadas por diversos autores, de medir la cuña de sedimentos retenidos en los diques forestales con el fin de cuantificar la erosión (Lien, 2003; May & Gresswell, 2003; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Bellín *et al.*, 2011; Sougnez *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2014).

1.6.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Los instrumentos utilizados son muy variados. Destaca el empleo del GPS para realizar levantamientos topográficos y en concreto mediciones de la cuña de sedimentos. Castillo *et al.* (2007) realizan esta medición a través de un instrumento GPS Trimble Geoexplorer3C. Boix-Fayos *et al.* (2008) emplean también un GPS Trimble GeoXM con corrección diferencial, pero para la ubicación de los diques. Por su parte, Romero (2008) realiza las mediciones de campo con un GPS Garmin E-TREX, posicionando los puntos del perímetro de la cuña de sedimentos. Por último, Sougnez *et al.* (2011) emplean un GPS diferencial DGPS — Trimble Mapping Device ProXRS para levantar la superficie de la cuña de sedimentación. Si bien los GPS son aparatos de medición cada vez más utilizados en topografía, y que pueden ser empleados con buenos resultados para realizar levantamientos topográficos de cuencas hidrográficas, la medición de la cuña de sedimentos debe realizarse con exactitud, de forma que un error del orden de metros, como el que pueden ofrecer estos instrumentos, producen errores en el resultado final de la cuña de sedimentación que no pueden ser asumidos en un estudio de estas características. Para reducir estos errores se utilizan GPS de precisión centimétrica (GPS submétricos o centimétricos basados en dos receptores-uno móvil y otro fijo) como el que utiliza Sougnez *et al.* (2011), que después de la corrección diferencial encontraron una precisión horizontal y vertical global de las mediciones de 0,45 m y 0,74 m respectivamente. Otro inconveniente importante de este instrumento es la pérdida de señal bajo cobertura vegetal (Navarro, 2014a, Com. Pers.), como la existente en zonas donde se han llevado a cabo restauraciones hidrológico-forestales, la cual imposibilita realizar las mediciones.

Por otro lado, Bellín *et al.* (2011) utilizan un medidor de distancias láser de alta resolución (Leica DISTO™ A8) para realizar las medidas de la cuña en campo. Este instrumento permite realizar mediciones de forma rápida y sencilla, si bien el exceso de vegetación puede dificultar la tarea e incrementar los errores. Además, Bellín *et al.* (2011) determinan las pendientes de las laderas por medio de un clinómetro, instrumento que puede ofrecer resultados variables en función de la sensibilidad en la apreciación por parte del operador y de la sensibilidad del instrumento. Sougnez *et al.* (2011) también emplean clinómetros y también decámetros pero tan sólo en cuñas de pequeña extensión.

Por último, destaca el empleo de la estación total para realizar mediciones en campo y levantamientos topográficos de gran exactitud. Son instrumentos muy utilizados precisamente por su gran exactitud y por eliminar el inconveniente del exceso de vegetación que no merma la exactitud en la medida. El principal inconveniente de la estación con respecto al GPS es que incrementa notablemente el tiempo de medición, si bien esta desventaja puede compensarse con la mayor exactitud que se obtiene en



zonas con gran cobertura arbórea. La precisión de la estación total es centimétrica pero la precisión de un GPS convencional es de varios metros. Los GPS submétricos o centimétricos basados en dos receptores-uno móvil y otro fijo, ofrecen resultados similares a los aportados mediante el uso de la estación total, pero no ofrece datos bajo cubiertas arbóreas de baja a alta densidad, siendo elevada su precisión en zonas sin vegetación. Bussi *et al.* (2013) realizan mediciones con GPS centimétrico obteniendo errores a escala mundial de en torno a 6 m, con una precisión relativa horizontal de 1,5 cm y vertical de 1,8 cm. Sin embargo, al no disponer de estos últimos y a que no son útiles bajo cubierta arbolada, para este trabajo de investigación se ha decidido utilizar la estación total, un instrumento de medición de gran precisión para elementos en los que se requiere una medición de detalle, como es el caso de estudio (Díaz *et al.*, 2014).

1.6.2. METODOLOGÍAS PARA LA CUBICACIÓN DE LA CUÑA DE SEDIMENTOS

La determinación del volumen de la cuña de sedimentos se ha realizado frecuentemente por su facilidad de aplicación, asimilando la cuña de sedimentos a un prisma (Lien, 2003; May & Gresswell, 2003; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Bellín *et al.*, 2011; Sougnez *et al.*, 2011). Castillo *et al.* (2007), por ejemplo, asemejan el volumen de sedimentos retenido aguas arriba del dique a un canal prismático con sección rectangular, basándose en los estudios de Lien (2003), y May & Gresswell (2003). Consideran que las grandes corrientes de los canales (ramblas) suelen mostrar una forma de U en sección transversal, y en ellos se supone que el ancho del cauce actual en la superficie (que se corresponde con el ancho de la cuña de sedimentos) es el mismo que el ancho del cauce original, sin variación, por tanto, con el paso de los años. Por ello, en estos canales se calcula el volumen de la cuña de sedimentos retenidos aguas arriba de los diques asemejándola a un canal prismático de sección rectangular, aplicando la siguiente ecuación:

$$V = \frac{w_s \cdot l_s \cdot h}{2} = \frac{S \cdot h}{2}$$

Donde, V es el volumen del sedimentos (m^3), l_s es la longitud de la cuña de sedimentación (m) medida sobre el terreno, w_s es la anchura media de la cuña de sedimentos (m), que se define como S/l_s , siendo S la superficie de la cuña de sedimentos (m^2), determinado su perímetro, asignada con el GPS, y h es la altura de los sedimentos medidos desde la base del dique (m).

Boix-Fayos *et al.* (2008) siguen esta misma metodología, y asumen que la cuña aluvial tiene forma de canal prismático de sección rectangular, basándose igualmente en Prosser & Karssies (2001) y Lien (2003). Sin embargo, esta aproximación no se ajusta a la realidad, ya que suponen una forma que no es real, y para su cálculo utilizan únicamente los datos de anchura y longitud de la cuña, por lo que se considera que ofrece desviaciones importantes de la realidad.

Castillo *et al.* (2007) señalan que, sin embargo, en zonas montañosas, y con pequeños arroyos tributarios, se observa una sección transversal con forma de V (Figura 1.17). En éstos, la anchura media de la cuña de sedimentos (w) se estimó como:

$$w = \frac{(w_b + w_s)}{2}$$

Donde w_b es el ancho del canal en la sección aguas abajo del dique, y w_s la anchura media de la cuña de sedimentación.

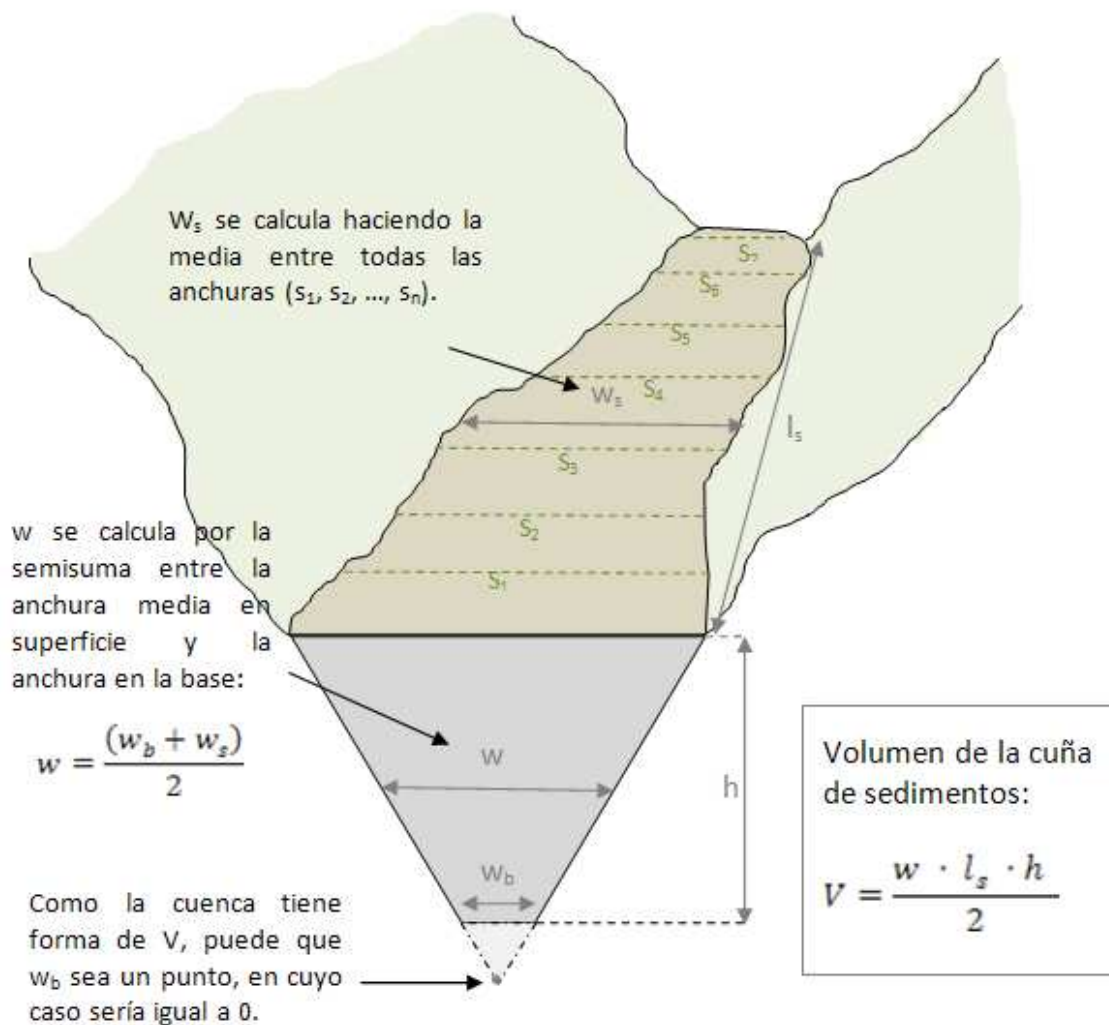


Figura 1.17. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007). S_i =anchura de la cuña en la sección transversal i ; w_s =anchura media de la cuña de sedimentación (calculado como la media de las anchuras de la cuña en las secciones transversales i); w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; w =anchura media del canal relleno de sedimentos; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; l_s =longitud de la cuña de sedimentos

El volumen de sedimentos almacenados aguas arriba de los diques se estima aplicando la fórmula:

$$V = \frac{(w \cdot l_s \cdot h)}{2}$$

Donde h es la altura de los sedimentos medidos desde la base del dique, l_s es la longitud de la cuña de sedimentos, y w es la anchura media del canal relleno de sedimentos (Figura 1.17).

Por último, Romero *et al.* (2007a) miden la superficie de la cuña de sedimentos con GPS métricos, igualmente, posicionando los puntos de su perímetro, y calculando el área por ordenador, asociando el volumen con la figura geométrica que considera más parecida a la forma tridimensional de los sedimentos acumulados en el dique: la de una pirámide de base trapezoidal en posición horizontal (Hernández *et al.*, 2004). De esta forma, la fórmula utilizada para el cálculo del volumen de sedimentos en los diques ha sido la del volumen de la pirámide de base trapezoidal, delimitada por la superficie de los sedimentos sobre el dique:

$$V = \frac{B \cdot H}{3}$$

Donde V es el volumen de sedimentos, B el área de la base coincidente con el dique, y H la longitud de la cuña de sedimentos medida en campo (Figura 1.18).

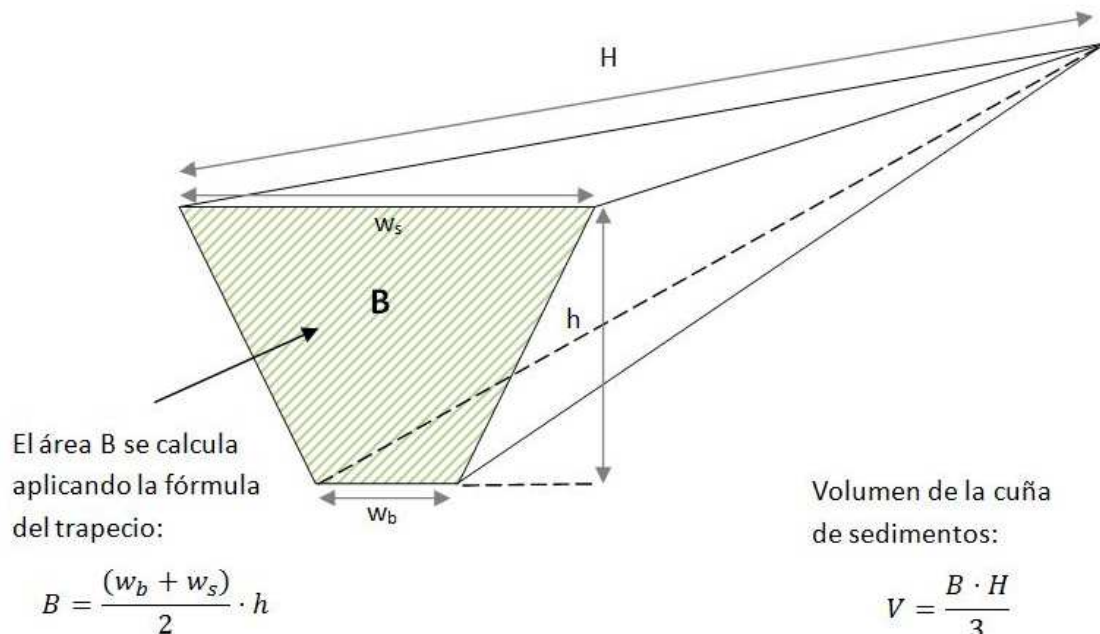


Figura 1.18. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Romero *et al.* (2007a). w_s =ancho de la base del dique en la sección aguas arriba de éste; w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; B =área de la base coincidente con el dique; H =longitud de la cuña de sedimentos



Esta estimación supone que el extremo de la cuña termina en un punto, y no en todos los casos es así, de forma que también se trata de un método inexacto en bastantes casos que generaliza con estas fórmulas para cualquier cuña.

Dado que las fórmulas propuestas por los diversos autores realizan suposiciones muy generales, que pueden dar lugar a graves errores en la medición de los depósitos de sedimentos, se ha desarrollado una nueva metodología de mayor exactitud para la medición de la cuña de sedimentos y estimación del volumen total de sedimentos retenidos en una cárcava que realiza un mayor número de mediciones en campo gracias a un trabajo topográfico de detalle, y se ha aplicado en la zona de estudio para analizar su efectividad.

1.7. LA PENDIENTE DE COMPENSACIÓN EN LOS DIQUES FORESTALES

Siguiendo la sentencia de los ingenieros restauradores de las cuencas hidrográficas de montaña de finales del siglo XIX, *“No se puede corregir un torrente, si previamente no se ha corregido su cuenca alimentadora”* (Sendra, 2002), las medidas clásicas de la hidráulica torrencial han pretendido corregir los torrentes a través de dos fases, una primera en la que se controlan los procesos lineales de erosión en la garganta del torrente que provocan los deslizamientos de las laderas, regulando la erosión remontante a través del establecimiento de una pendiente de equilibrio o pendiente de compensación; y una segunda, en la que se corrige la cuenca a través de actuaciones de restauración y repoblación que tratan de consolidar las medidas correctoras llevadas a cabo (op. cit). De este modo se consigue establecer un funcionamiento hidráulico e hidrológico de la cuenca que vierte al torrente, manteniendo la morfología de su red de drenaje y la disposición de las laderas vertientes a la misma, y con el fin último de mantener el equilibrio en toda la cuenca de recepción (op. cit). Estas técnicas clásicas consisten en escalonar los torrentes que sufren procesos de erosión remontante dentro de la cuenca a través de diques transversales al cauce, definiéndose entre estos diques una pendiente denominada pendiente de equilibrio o pendiente de compensación, inferior a la que poseía originalmente el torrente (Mintegui & López, 1990; Mintegui, 1993; Sendra, 2002). Es decir, la pendiente del lecho de la cuña de sedimentos en los diques de retención es lo que se denomina pendiente de compensación o pendiente de equilibrio. La construcción de forma escalonada de estos diques viene definida por esa pendiente de compensación, que a su vez define la longitud del aterramiento. De esta forma, en la sección que delimita el extremo de la cuña de sedimentación se construye el siguiente dique aguas arriba, y así sucesivamente (Mintegui & López, 1990; Mintegui, 1993) (Figura 1.19).

De acuerdo con Heede & Mulich (1973), el espaciamiento óptimo entre estos diques es aquel que no interfiera con la zona de deposición de sedimentos del dique ubicado inmediatamente aguas abajo. Mussetter (1982) indica que este espaciado depende de la longitud del tramo de deposición formado tras el dique, la cual depende de la pendiente de la cuña de sedimentación. Johnson & Minaker (1944) definen espaciamiento óptimo al formado prolongando una línea desde la coronación del

dique siguiendo la inclinación de la pendiente de equilibrio aguas arriba, hasta la intersección con el lecho original del cauce. Aquí se deduce la necesidad de conocer adecuadamente la pendiente de compensación. Por último, Conesa (2004) y Conesa & García (2007a) indican que el espaciamiento entre los diques se calcula dividiendo la altura de estas estructuras entre la pendiente longitudinal (en tanto por ciento), de acuerdo con la Tabla 1.8. No obstante, la mayor eficacia de estas estructuras se consigue instalándolas en aquellas zonas donde exista un cambio de pendiente (Forsythe, 1985)

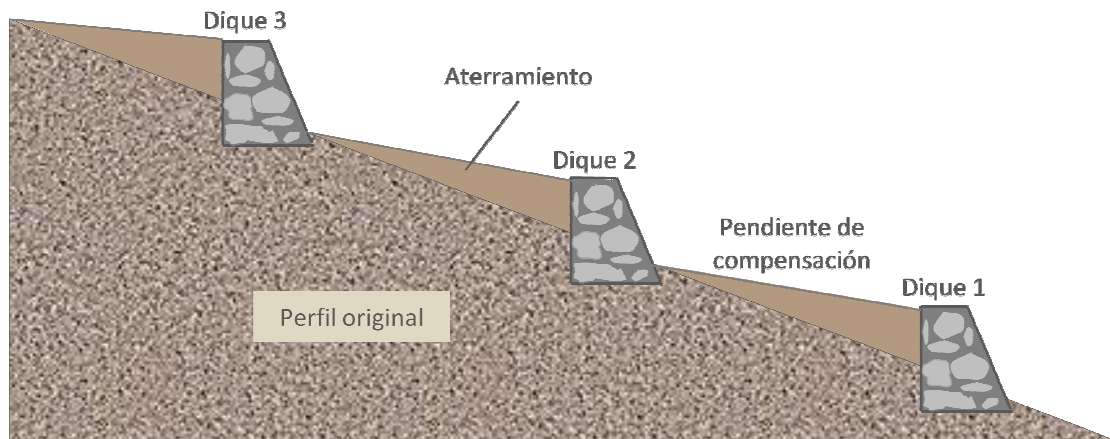


Figura 1.19. Modificado de Mintegui (1993)

Tabla 1.8. Espaciamiento entre diques de acuerdo con la pendiente longitudinal del cauce (Conesa, 2004; en base a Minnesota Pollution Agency, 2000)

Pendiente (%)	Espaciamiento (m)
1	200
2	100
4	50
6	33
8	25
10	20

La pendiente del cauce conseguida con estas estructuras depende del número de diques de retención construidos. La máxima regulación se consigue cuando la coronación de un dique y el pie del dique situado aguas arriba de éste están a la misma cota, de forma que si los diques tienen gran altura estarán más espaciados y viceversa. La altura efectiva para diques gavionados es de 5 metros. Conesa (2004) y Conesa & García (2007a) indican la siguiente función para determinar la cantidad óptima de diques:

$$N_{dr} = (S_1 - S_2) \cdot \frac{L}{H}$$

Donde N_{dr} es el número de diques de retención, S_1 es la pendiente original (%), S_2 es la pendiente resultante (%), L la longitud del cauce (m) y H la altura del dique (m). Según esta fórmula, si se duplica la altura del dique se reducen los diques a la mitad y



viceversa, pero el volumen de material necesario no sigue esta relación. Roshani (2003) establece el material necesario para dos tipos de diques (Tabla 1.9), mostrando como el volumen de material necesario por metro de anchura del cauce es aproximadamente la tercera parte para diques de 1,5 metros de altura que para diques del doble de altura.

Tabla 1.9. Volumen de material necesario para la construcción de dos tipos de diques de gaviones según sus características geométricas (Roshani, 2003)

Dique	Altura (m)	Anchura coronación (m)	Anchura base (m)	Material necesario (m ³ ·m)
Tipo 1	1,5	2,0	4,0	6,75
Tipo 2	3,0	3,0	6,5	21,38

Por su parte, la altura de la estructura depende de la pendiente estable calculada, de acuerdo con la siguiente ecuación (Conesa & García, 2007a):

$$H_d = (S_1 - S_2) \cdot L$$

Donde S_1 es la pendiente original (m/m), S_2 es la pendiente estable y L la longitud del tramo estudiado (m). La altura del dique influirá directamente en el coste económico y en el volumen de sedimentos retenidos aguas arriba del dique, por lo que la determinación de la pendiente de equilibrio resulta especialmente útil para realizar un estudio de costes de una restauración hidrológica del cauce (Conesa & García, 2007a). De esta forma, si la pendiente estimada es demasiado baja la altura será demasiado elevada, lo cual producirá un relleno parcial de la estructura con sus consiguientes sobrecostes. Por el contrario, una pendiente estimada demasiado elevada podría generar una situación de colmatación total de los diques de forma que no sean capaces de conseguir la pendiente estable deseada, dejando al tramo en cuestión desprotegido frente a la erosión remontante (Conesa & García, 2007a).

Para la determinación de la pendiente estable en torrentes se han planteado diversos métodos a lo largo de la historia, algunos de los cuáles se exponen a continuación:

- El método de Novak, presentado por Graz en el estudio sobre la "Determinación de la pendiente estable de los torrentes" en el Simposio Internacional de la INTERPRAEVENT 1988 y resumido por López-Cadenas (1998). Este método se basa en determinar la estabilidad del lecho mediante el equilibrio entre las fuerzas activas que actúan sobre el lecho y la resistencia ejercida por éste sobre aquéllas. Las fuerzas activas son el empuje hidrodinámico global, el empuje hidrodinámico ascensional y el peso del material sumergido. La fórmula que determina la pendiente estable (I) es la siguiente:

$$I = 0,0035 \cdot \frac{K_3 \cdot d \cdot (\rho_m - \rho) \cdot 2 \cdot g \cdot f}{(K_1 \cdot C_\alpha + K_2 \cdot f)} \cdot \frac{d_m}{R}$$



Donde K_1 , K_2 y K_3 son coeficientes formales que dependen del material geológico del cauce (Tabla 1.10); d es el diámetro del material (m); ρ_m es la masa específica del material ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (Tabla 1.10); ρ es la masa específica del agua ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$); g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m}\cdot\text{seg}^{-2}$); f es el coeficiente de resistencia del lecho al comienzo del movimiento del material (Tabla 1.10); d_m es la profundidad a la que la velocidad del lecho influye sobre la estabilidad del material (m); C_α es el coeficiente de resistencia al empuje hidrodinámico global (Tabla 1.10); C_y es el coeficiente de resistencia al empuje hidrodinámico ascensional (toma el valor de 0,178); y R es el radio hidráulico de la sección (m).

O también:

$$I_c = 0,0035 \cdot C^2 \cdot \frac{d_m}{R}$$

Donde C es una constante que depende del material geológico del cauce, de acuerdo con la Tabla 1.10.

Tabla 1.10. Valores de los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 , f , C_α de la masa específica ρ_m y de la constante C para los diferentes materiales geológicos (López-Cadenas, 1998)

Roca	K_1	K_2	K_3	ρ_m	f	C_α	C
Granito	0,726	1,017	0,418	2.620	1,36	0,46	5,58
Cuarzo-pórfido	0,671	1,016	0,363	2.580	1,38	0,56	4,98
Migmatita	0,675	1,134	0,368	2.690	1,35	0,44	5,38
Gneis	0,738	1,290	0,384	2.630	1,27	0,48	4,91
Granodiorita	0,687	1,153	0,358	2.700	1,46	0,56	5,05
Granulita	0,684	1,120	0,353	2.630	1,39	0,58	4,83
Basalto	0,758	1,131	0,375	2.860	1,48	0,45	6,63
Esquisto	0,696	1,256	0,340	2.680	1,40	0,83	4,20
Mica-esquisto	0,591	1,161	0,349	2.710	1,24	0,46	5,24
Filita	0,592	1,225	0,340	2.700	1,34	0,46	5,19
Permocarbón-arenisca	0,666	1,031	0,371	2.550	1,14	0,47	4,96
Flyson-arenisca	0,659	1,194	0,361	2.550	1,20	0,49	4,77
Greda-arenisca	0,640	1,125	0,359	2.000	1,54	0,50	4,15
Grauvaca	0,705	1,391	0,335	2.680	1,31	0,51	4,60
Marga	0,532	1,025	0,290	2.470	1,39	0,58	4,58

- La fórmula propuesta por Mintegui (1990), basada en la relación de proporcionalidad entre las pendientes de compensación (j y j_0) en dos secciones de un mismo torrente y los productos de sus caudales (Q y Q_0) y sus perímetros mojados (x y x_0), siendo j la pendiente de compensación que se desea conocer y la sección 0 es aquella de la que se conocen los datos de campo y por tanto es utilizada para calcular la variable deseada por comparación:

$$j = \frac{j_0 \cdot x \cdot Q}{(x_0 \cdot Q_0)}$$



- La fórmula propuesta por el Doctor D. Antonio Pérez-Soba Baró (1931-1985) y recogida por Mintegui (1990), que también determina la pendiente de compensación por comparación (j) (Pérez Soba, 2002):

$$j = j_0 \cdot \left(\frac{b}{b_0}\right)^{0,86} \cdot \left(\frac{A_0}{A}\right)^{0,86-C} \cdot e^{-1,43 \cdot n \cdot (x-x_0)}$$

Donde j_0 es la pendiente de compensación medida en un lugar de la cuenca en el que, ya sea por aterramiento de un dique o por estrechamiento natural, se supone que el lecho ha adquirido este carácter (%); b_0 es el ancho medio del cauce en la zona en que se ha medido esa pendiente (m); b es el ancho medio del aterramiento previsible en la zona en que se quiere medir la pendiente j (m); x y x_0 son las longitudes de recorrido del curso de agua desde su nacimiento hasta, respectivamente, el punto en que se desea calcular la pendiente o el punto en que se da el estrechamiento del cauce que ya ha adquirido la pendiente de compensación (km); A y A_0 son las superficies de las cuencas afluyentes al punto de cálculo y al de medición, respectivamente (km²); y n y C son los coeficientes de la relación de Sternberg y de la expresión exponencial del caudal generado por la superficie de la cuenca, respectivamente.

- El método SABO (Corrección de torrentes en la terminología japonesa) en Japón (Vargas, 2006), que propone la siguiente relación:

$$\frac{1}{2} \cdot \alpha_c = \frac{2}{3} \cdot \alpha$$

Siendo α el ángulo correspondiente a la pendiente original del cauce (º) y α_c el ángulo correspondiente a la pendiente de compensación (º)

- La fórmula de Romiti (1957), en Italia (Vargas, 2006):

$$S_c = \frac{1}{3 + \frac{1-1,5 \cdot S}{S+S^3} \cdot \left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{b}{b_c}\right)^2}$$

Donde S es la pendiente original del cauce en el tramo del dique; S_c es la pendiente de compensación en el tramo de la presa; $d_{m\acute{a}x}$ es el tamaño máximo de las partículas del cauce (m); d_c es el tamaño más común (d_{50}) de las partículas del cauce (m); b es el ancho original del cauce en creciente (m); b_c es el ancho del cauce después de la colmatación del dique. Se toma la longitud de la cresta de la presa (m).

- Y la teoría de García-Nájera (1943) en España, que se expone a continuación.



Una de las mayores contribuciones de García-Nájera (1943) a la Hidráulica Torrencial es la definición del concepto de pendiente de compensación de la siguiente manera: *“Cuando una corriente saturada pasa sobre un lecho formado por acarreos de igual naturaleza y composición granulométrica que los que constituyen el caudal sólido de la corriente, se puede afirmar que ésta tiene la pendiente de compensación”*. Por tanto, la pendiente de compensación está definida para un caudal líquido concreto, conocido como caudal generador del lecho, que Schaffernak (1922) define como *“aquel en el que el producto de su capacidad de arrastre por la frecuencia con la que se presenta es máximo”*. Se puede definir de forma más sencilla como aquel que explica la existencia de un lecho estable en el tiempo. De acuerdo con Martínez de Azagra (1993) si se multiplica la cantidad de sedimentos que transporta la corriente durante las avenidas por el caudal generador del lecho se puede estimar la emisión de sedimentos, siempre que se analice un tramo de cauce que haya alcanzado la pendiente de compensación.

Paralelamente al concepto de pendiente de compensación se trata el concepto equilibrio o pendiente de equilibrio. Sin embargo, en la Hidráulica de Sedimentos estos dos conceptos que persiguen el mismo objetivo no son sinónimos. López-Alonso (1997) define pendiente estable como aquella pendiente que el caudal generador del lecho no puede erosionar. Sendra (2002) indica que para que exista estabilidad deben cumplirse dos condiciones:

- Que la corriente se encuentre saturada de sedimentos
- Que la proporción de sedimentos que se depositan en el lecho al circular por él una determinada corriente y la proporción de sedimentos que se incorporan a ésta sean equivalentes.

No serán equivalentes si los sedimentos del lecho son de diferente naturaleza y composición granulométrica que los que transporta la corriente. Así, si el volumen de sedimentos que pasan a formar parte de la corriente difiere del volumen de sedimentos que quedan depositados la pendiente continuará variando hasta que estos dos conceptos se iguallen. Pero esa igualdad debe darse tanto en cuanto a capacidad de arrastre como en cuanto a volumen de sedimentos para que haya compensación y se encuentre en equilibrio la pendiente (Sendra, 2002).

Para calcular la pendiente de compensación se han planteado diversos modelos, si bien algunos tratan solamente el aspecto de pendiente de equilibrio.

Tanto García-Nájera (1943) como Takahashi (1991) plantean modelos para representar la formación y posterior evolución del cono de sedimentación de un curso torrencial con flujos inerciales (Sendra, 2002). Ambos modelos tratan sobre el concepto de pendiente estable o pendiente de equilibrio. Para García-Nájera se corresponde con la pendiente de compensación del torrente; sin embargo para Takahashi se trata de una pendiente crítica de un flujo cinemático cargado de arrastres. La forma de establecerlo difiere en ambos modelos, si bien se presume que el segundo planteamiento está orientado a comprender los flujos inerciales de los torrentes de Japón, donde el método de corrección de torrentes (método SABO en la terminología japonesa, cuya fórmula para el cálculo de la pendiente de compensación se ha expuesto



anteriormente) establece tres posibles fases en la formación de las pendientes de equilibrio en los torrentes de gran pendiente (Mintegui, 1993):

- a) Primera fase: se produce un llenado del vaso de almacenamiento que se forma aguas arriba del dique. Puede ocurrir que se produzca rápidamente, de forma que transitoriamente la nueva pendiente puede adoptar un valor importante, si bien no se tratará de una situación de equilibrio.
- b) Segunda fase: eventos de carácter más o menos extraordinario producen erosión en el cauce del torrente, aguas arriba del dique.
- c) Tercera fase: se establece la pendiente de compensación definitiva, inferior a la pendiente original del torrente y adaptada al sistema corrector proyectado.

García-Nájera se basa en las siguientes ecuaciones para establecer la pendiente de compensación (Sendra, 2002):

- Ecuación de una corriente con arrastres
- Ecuación del transporte máximo
- Ecuación que relaciona la tensión de arrastre de la corriente con las distintas velocidades que toman los distintos elementos que la componen; es decir: la velocidad del agua u , la velocidad de la suspensión v y la velocidad de los arrastres v_a , gracias a las cuáles plantea la siguiente ecuación:

$$u^7 + q \cdot u^4 - 3 \cdot \left(\frac{C_s^2 \cdot \tau}{\gamma} \right)^2 \cdot q = 0$$

Siendo q el flujo entrante lateral por unidad de longitud del canal, C_s el coeficiente de Bazin modificado, τ la tensión de arrastre y γ el peso específico del fluido. Su resolución permite conocer la velocidad de corriente u , a partir de la cual se obtiene la pendiente de compensación j por aplicación de la fórmula de Bazin, con el coeficiente modificado C_s :

$$u = C_s \cdot \sqrt{h \cdot j}$$

Por lo que resulta que la pendiente de compensación j se calcula aplicando la siguiente ecuación, en la que g es la aceleración debida a la gravedad:

$$j = \frac{g \cdot u^3}{2 \cdot C_s^2 \cdot q}$$

La Figura 1.20 esquematiza el cálculo de la pendiente de compensación definido por García Nájera, con una serie de modificaciones realizadas por Sendra (2002) para su comprensión.

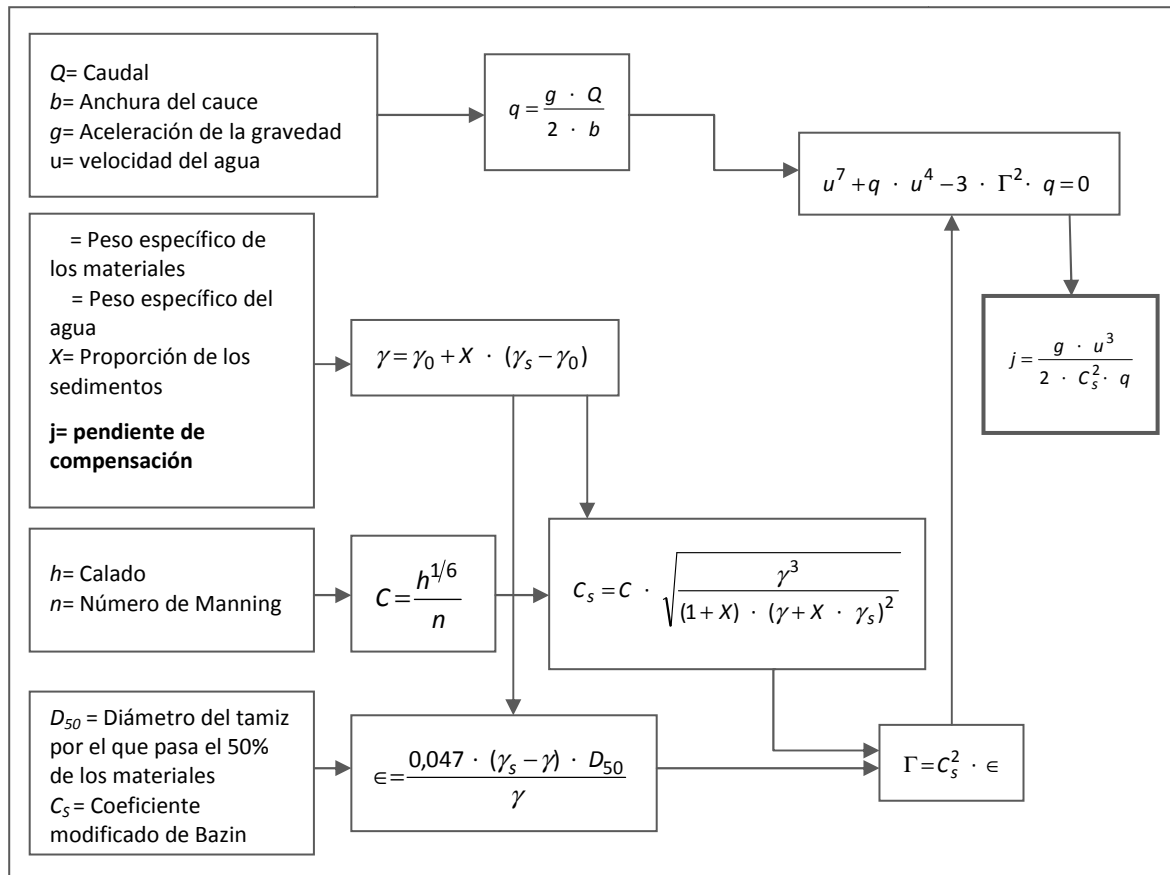


Figura 1.20. Cálculo de la pendiente de compensación según García-Nájera (modificado de Sendra (2002))

Por último, Vargas (2006) recopila una serie de ecuaciones que se pueden emplear de forma práctica para determinar el valor de la pendiente de compensación (Tabla 1.11).

No obstante, la pendiente de equilibrio es un concepto teórico resultante de los procesos erosivos y fluviales naturales que pueden ser modificados por acción del hombre (Conesa & García, 2007a).

Tabla 1. 11. Ecuaciones planteadas por Vargas (2006) para calcular la pendiente de compensación

De forma general	$0,50 \cdot S \leq S_C \leq 0,67 \cdot S$
Experiencia Italiana	$S_C = 0,66 \cdot S$
Experiencia Norteamericana	$S_C = 0,70 \cdot S$
Experiencia PROMIC (Cochabamba, Bolivia)	$S_C = 0,81 \cdot S$
Método de cálculo recomendado	$S_C = 0,65 \cdot S$

S_C : Pendiente de compensación; S : Pendiente original del torrente



2. OBJETIVOS

Atendiendo a lo expuesto, resulta necesario estimar con exactitud los sedimentos retenidos por los diques para poder evaluar adecuadamente su función, el control que realizan sobre la erosión, así como estimar las características principales de sus cuñas para su correcto emplazamiento en los proyectos de restauración hidrológico-forestal.

De este modo, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el papel de los diques forestales en el control de la erosión y emisión de sedimentos en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles, situada en una zona de cárcavas con textura principalmente arenosa y bajo clima mediterráneo continental, tras 48 años de su ejecución, así como valorar su influencia en la emisión de sedimentos hacia las corrientes principales de la zona, y caracterizar las cuñas de sedimentos (pendiente y longitud) que conforman.

Se plantea la hipótesis de que los diques han realizado un papel positivo en el control de la erosión y emisión de sedimentos en la zona, permitiendo estabilizar el relieve y mejorar las condiciones de calidad y ecológicas de las aguas ubicadas aguas abajo del área de estudio, y para verificar esta hipótesis se detallan una serie de objetivos particulares:

- Desarrollar y aplicar una metodología de gran exactitud para medir el volumen de sedimentos atrapados en los diques de retención de sedimentos construidos en la zona de estudio, basada en trabajo topográfico de detalle y en cálculo matricial.
- Determinar, a partir de dicha metodología, la tasa de erosión anual retenida en la zona de estudio.
- Determinar la eficiencia de trampa de los diques de la restauración hidrológico-forestal y a partir de este dato estimar la cantidad de sedimentos emitidos aguas abajo de la restauración.
- A partir de las tasas de retención y de emisión de sedimentos, estimar la tasa de erosión anual de la zona de la restauración.
- Contrastar el resultado obtenido con la metodología desarrollada en este trabajo y los resultados que se obtienen aplicando otras metodologías propuestas por otros autores y de uso frecuente, tanto en cuanto a la estimación del volumen de sedimentos como en cuanto a las tasas de erosión y emisión derivadas de esa estimación.
- Evaluar el efecto del control de erosión y sedimentos en las corrientes naturales aguas abajo de la zona restaurada.
- Analizar los cambios geomorfológicos originados en la zona de la restauración a partir de la determinación de la pendiente modificada de la cuña de sedimentos retenida por cada uno de los diques, así como las consecuencias de esa modificación, con vistas a su aplicación en el diseño y ejecución de este tipo de obras.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. LOCALIZACIÓN Y SITUACIÓN

La zona de estudio se localiza en el término municipal de Tórtoles, situado en el cuadrante suroccidental de la provincia de Ávila, comunidad autónoma de Castilla y León, España (Figura 3.1), a 60 km de distancia de la capital abulense, y en pleno Valle del río Corneja. Exactamente, su territorio principal se encuentra entre los 40° 32' 35" y los 40° 35' 44" de latitud norte y entre los 5° 14' 53" y los 5° 18' 23" de longitud oeste (en coordenadas UTM, entre las coordenadas X: 310042 e Y: 4490448 y las coordenadas X: 304831 e Y: 4496496, huso 30).

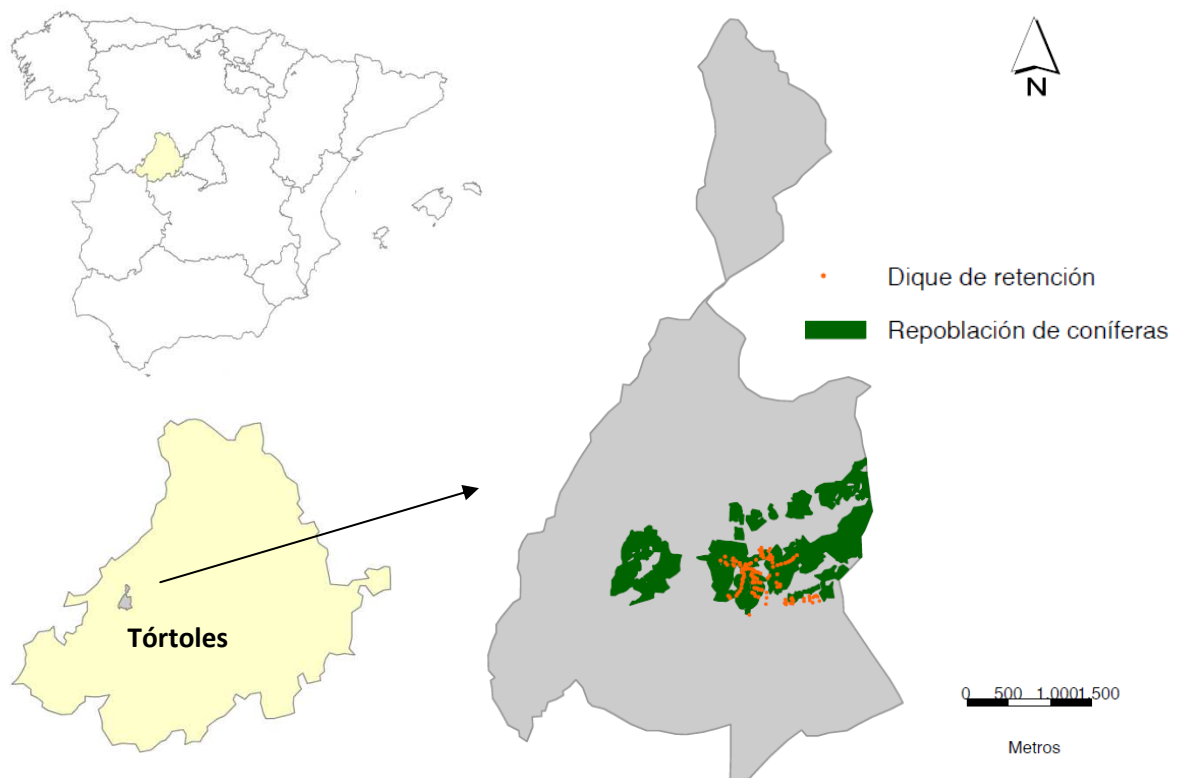


Figura 3.1. Localización del área de estudio

El municipio está situado en la falda de la Sierra de Ávila y comprende una transición altimétrica que pasa desde el margen septentrional del Valle del Corneja hasta las cumbres de la sierra. El Valle del Corneja se encaja entre la Sierra de Ávila, la Serrota y la Sierra de Piedrahíta, todas ellas estribaciones de la Sierra de Gredos, la parte más alta del Sistema Central que cruza en dirección E-O el centro de la Península Ibérica.

Existen fuentes documentales que demuestran que desde el siglo XIV, zonas próximas al actual municipio de Tórtoles sufrían procesos de erosión debido a roturaciones que



fomentaban la escorrentía (Barranco, 1993). Por tanto, la erosión es un problema en la zona desde hace cientos de años.

Fotografías aéreas de 1945 confirman la práctica ausencia de vegetación en las laderas y barrancos de Tórtoles, que sufrían fuertes procesos erosivos y se encontraban gravemente degradados debido, principalmente, al sobrepastoreo y el abusivo aprovechamiento de madera y leñas del monte (Mongil *et al.*, 2013). Por este motivo Tórtoles fue objeto de un proyecto de restauración hidrológico-forestal redactado en 1964 por el ingeniero de montes David Azcarretazábal Mantecón, ejecutado en 1965, que contemplaba la repoblación de 428,41 ha de cuencas de pequeños torrentes y arroyos tributarios del río Corneja, en altitudes comprendidas entre 1.100 y 1.500 m, sobre las laderas que enlazan el valle con la sierra en la franja central del municipio, y la construcción de un total de 313 diques forestales, en concreto diques gavionados, de los que finalmente se ejecutaron 123.

El proyecto de restauración hidrológico-forestal tuvo importancia, no sólo desde el punto de vista ambiental, sino también social, debido al grave riesgo de deslizamientos, corrientes de lodo, avalanchas de tierra y fango, y problemas de erosión que sufrían las laderas del municipio de Tórtoles, especialmente en las partes altas del caserío. En las Figuras 3.2 a 3.5 se puede observar el aspecto de las laderas y barrancos de Tórtoles, tanto previo a la restauración hidrológico-forestal como en el estado actual, 50 años después.

Sin embargo, la restauración no se circunscribió solo al territorio de este municipio sino que, de acuerdo con la planificación original (Azcarretazábal, 1964), en los años posteriores (hasta 1971) se completaría la rehabilitación de las laderas degradadas de la vertiente norte del río Corneja.



Figura 3.2. Vista general del monte, paraje Dos Ríos, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964); abajo en la actualidad.



Figura 3.3. Vista general de Las Cárcabas, Tórtoles, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964), abajo en la actualidad.



Figura 3.4. Vista general de El Arroyuelo, Tórtoles, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964), abajo en la actualidad.



Figura 3.5. Vista general de El Cerrón, Tórtoles, arriba previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964), abajo en la actualidad.



3.1.2. CLIMA

3.1.2.1. Adaptación de los datos climáticos

Dado que no existe ninguna estación meteorológica dentro del área de la restauración, se han adaptado los datos de otros observatorios próximos para realizar el estudio del clima. En cuanto a la pluviometría, se han utilizado los datos de la estación de Collado del Mirón (2838), ya que se encuentra en la misma vertiente de la Sierra de Ávila que el municipio de Tórtoles. La estación de Casas del Puerto de Villatoro también se encuentra cercana a la zona de estudio, pero sus datos no se han utilizado dado que se localiza en un punto de transición entre la Sierra de Ávila y La Serrota, por lo que se espera que las precipitaciones difieran en mayor medida con respecto al área de la restauración. En cuanto a los datos termopluviométricos, se ha seleccionado la estación de Navacedilla de Corneja (2834) al ser la más cercana a Tórtoles. En la Tabla 3.1 se recogen las principales características de estas estaciones y en la Tabla 3.2 se muestran los datos climáticos de partida para el análisis.

Tabla 3.1. Características de las estaciones meteorológicas de donde se han tomado los datos de partida para el estudio del clima en la restauración de Tórtoles (www.aemet.es)

Nombre	Collado Del Mirón	Navacedilla de Corneja
Provincia	Ávila	Ávila
Tipo de estación	Pluviométrica	Termopluviométrica
Código	2838	2834
Altitud	1.160 m	1.250 m
Latitud	40° 33'	40° 29'
Longitud	05° 21'	05° 11'
Orientación	Oeste	Oeste
Serie de datos	48 años	40 años
Año inicial de toma de datos	1966	1974
Año final de toma de datos	2013	2013

Respecto a la adaptación de los datos de precipitaciones, se ha comprobado que al realizar un ajuste por diferencia de altitud da resultados erróneos, muy elevados con respecto al clima real de Tórtoles, por lo que se ha realizado un estudio más detallado a partir de los datos que ofrece el SIGA (MAGRAMA, 2014). Se ha observado que en la zona no existe una correlación precipitación-altitud, sino que sigue un gradiente de precipitación de Este a Oeste, siendo ésta más abundante en la zona oriental. Por ello se ha realizado una corrección de los datos que consiste en multiplicar la precipitación registrada en Collado del Mirón por un coeficiente que representa este gradiente, obtenido de dividir la precipitación anual de Tórtoles entre la precipitación anual de Collado del Mirón para la serie de años de 1966 a 2013, y calculado en 1,046. Por su parte, la temperatura se ha adaptado de acuerdo con la altitud, tomando como dato de partida que la elevación media de la restauración de Tórtoles es de 1.315 m y aplicando un gradiente para la correlación altitud-temperatura que se ha calculado en



0,981 para la corrección de los datos de Navacedilla de Corneja. Con todas estas correcciones se obtienen los datos climatológicos adaptados para Tórtoles (Tabla 3.3).

Tabla 3.2. Datos climatológicos de partida para el estudio del clima en la restauración de Tórtoles (Fuente: AEMET)

Estación	Collado del Mirón		Navacedilla de Corneja				
	P (mm)	P _d (mm)	TM (°C)	TMM (°C)	TMm (°C)	TMA (°C)	TmA (°C)
Enero	51,7	37,5	3,6	8,7	-1,5	14,4	-7,3
Febrero	47,6	60,5	4,1	9,5	-1,4	15,3	-6,7
Marzo	45,1	40,5	6,3	12,1	0,5	18,8	-5,1
Abril	56,5	32,6	8,0	13,7	2,2	20,8	-2,9
Mayo	64,2	49,1	11,4	17,6	5,3	24,4	0,2
Junio	40,5	71,0	16,3	23,5	9,2	29,6	3,9
Julio	16,0	43,7	19,6	28,6	10,6	33,0	6,0
Agosto	16,5	35,5	20,3	29,0	11,5	33,6	6,6
Septiembre	37,1	57,9	16,6	24,5	8,7	30,3	3,6
Octubre	65,0	75,4	11,5	17,9	5,1	24,8	-0,4
Noviembre	60,7	98,1	6,7	12,2	1,1	18,9	-4,3
Diciembre	57,4	55,5	4,4	9,4	-0,7	15,2	-6,1

P: precipitación media; P_d: precipitación máxima diaria anual; TM: temperatura media; TMM: temperatura media de las máximas; TMm: temperatura media de las mínimas; TMA: temperatura máxima absoluta; TmA: temperatura mínima absoluta

Tabla 3.3. Datos climatológicos del año medio de Tórtoles

	P (mm)	P _d (mm)	TM (°C)	TMM (°C)	TMm (°C)	TMA (°C)	TmA (°C)
Enero	54,1	39,2	2,6	7,5	-2,5	13,1	-8,3
Febrero	49,8	63,3	3,1	8,5	-2,4	14,3	-7,6
Marzo	47,1	42,4	5,2	11,1	-0,5	17,8	-5,9
Abril	59,1	34,1	7,0	12,7	1,3	19,9	-3,9
Mayo	67,1	51,4	10,5	16,6	4,3	23,4	-0,8
Junio	42,4	74,3	15,4	22,5	8,2	28,6	2,9
Julio	16,8	45,7	18,6	27,6	9,6	32,0	5,0
Agosto	17,3	37,1	19,3	28,0	10,5	32,7	5,6
Septiembre	38,8	60,6	15,6	23,5	7,7	29,3	2,6
Octubre	68,0	78,9	10,5	16,9	4,1	23,8	-1,3
Noviembre	63,5	102,6	5,7	11,2	0,1	17,9	-5,2
Diciembre	60,1	58,1	3,4	8,4	-1,7	14,3	-7,1
Anual	584,0	687,5	9,7	16,2	3,2	22,2	-2,0

P: precipitación media; P_d: precipitación máxima diaria mensual; TM: temperatura media; TMM: temperatura media de las máximas; TMm: temperatura media de las mínimas; TMA: temperatura máxima absoluta; TmA: temperatura mínima absoluta

3.1.2.2. Características generales del clima

El clima de la zona de estudio, en gran parte condicionado por la diversidad de su paisaje, es de transición entre el clima de la meseta, seco y frío, y el clima de la sierra de Gredos, lluvioso y moderadamente frío.

Las temperaturas se mantienen suaves todo el año con mínimas durante el invierno y máximas en el periodo estival (Figura 3.6). El mes más cálido es agosto, que en el periodo estudiado ha llegado a alcanzar una temperatura máxima de 32,7°C; y el mes más frío es enero, que junto con febrero, marzo y diciembre registra unas medias de temperatura mínima inferiores a 0°C.

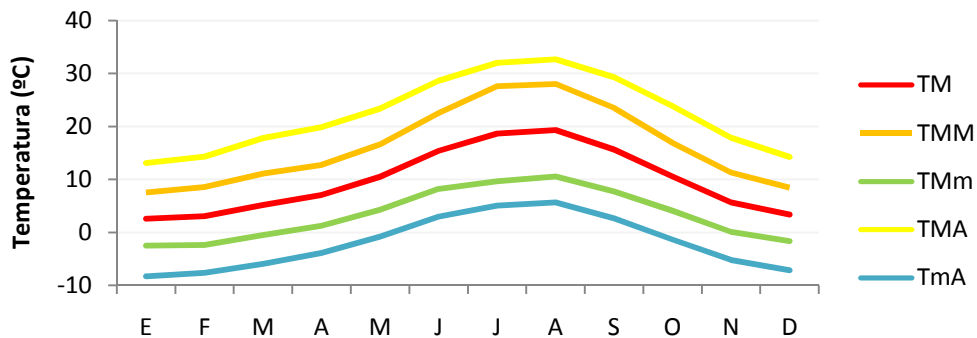


Figura 3.6. Temperaturas concurrentes a lo largo del año en la restauración de Tórtoles
TM: temperatura media; *TMM*: temperatura media de las máximas; *TMm*: temperatura media de las mínimas; *TMA*: temperatura máxima absoluta; *TmA*: temperatura mínima absoluta

La precipitación anual media asciende a 584,0 mm que se reparten de forma desigual a lo largo del año. En la Figura 3.7 se puede observar el fuerte descenso que se produce en el periodo estival, que registra tan sólo el 12,5 % de las precipitaciones anuales. La estación más lluviosa es el otoño con el 32,8 % de las precipitaciones anuales, y con una precipitación máxima diaria en el mes de noviembre de 102,6 mm (más de lo que llueve en todo el verano), si bien el mes más húmedo es octubre con 68,9 mm. Por último, la primavera y el invierno registran datos pluviométricos similares, con 28,9 % y 25,9 % de las precipitaciones anuales, respectivamente.

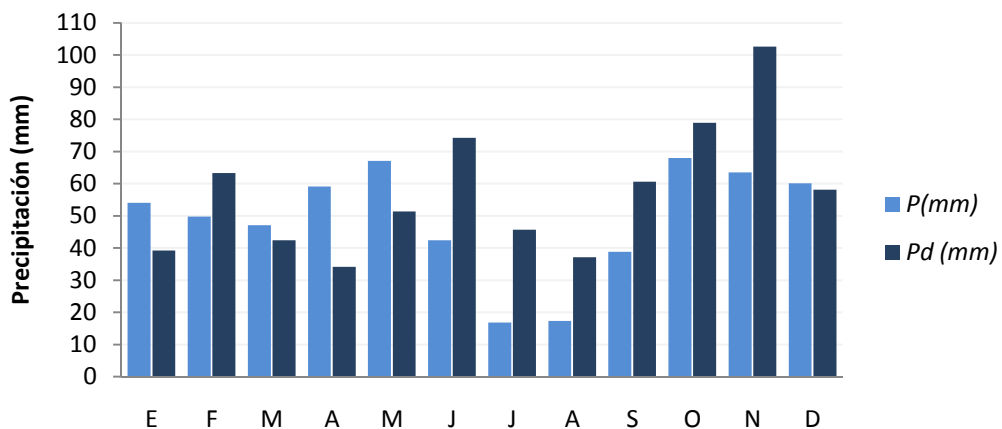


Figura 3.7. Precipitaciones a lo largo del año en la restauración de Tórtoles. *P*: precipitación mensual media; *P_d*: precipitación máxima diaria mensual

3.1.2.3. Caracterización climática de la restauración de Tórtoles: clasificaciones e índices climáticos

Para realizar la caracterización climática de la zona de estudio se ha aplicado el climodiagrama de Walter & Lieth (1967), tomando como datos de partida los señalados anteriormente en la Tabla 3.3. El climodiagrama de Tórtoles (Figura 3.8) muestra el descenso de precipitaciones durante el periodo estival, si bien la precipitación anual no es excesivamente baja (584,0 mm). Las temperaturas son frías en invierno y relativamente cálidas en verano, con una media de 9,7°C. El clima de Tórtoles es mediterráneo en cuanto a precipitaciones (sequía estival) pero continental en cuanto a temperaturas (bastante extremas, debido a la situación alejada del mar). El periodo de helada segura es de 2 meses, correspondiente con enero y febrero, y justificada por su situación en el interior de la Península Ibérica y su altitud (1.315 m); el periodo de helada probable, sin embargo, se extiende desde marzo hasta mayo y desde septiembre a diciembre, y por lo tanto el periodo libre de helada es de tan sólo 3 meses. Estos parámetros van a condicionar la vegetación que es capaz de establecerse en la zona, ya que las heladas tardías son muy perniciosas para muchas especies mediterráneas.

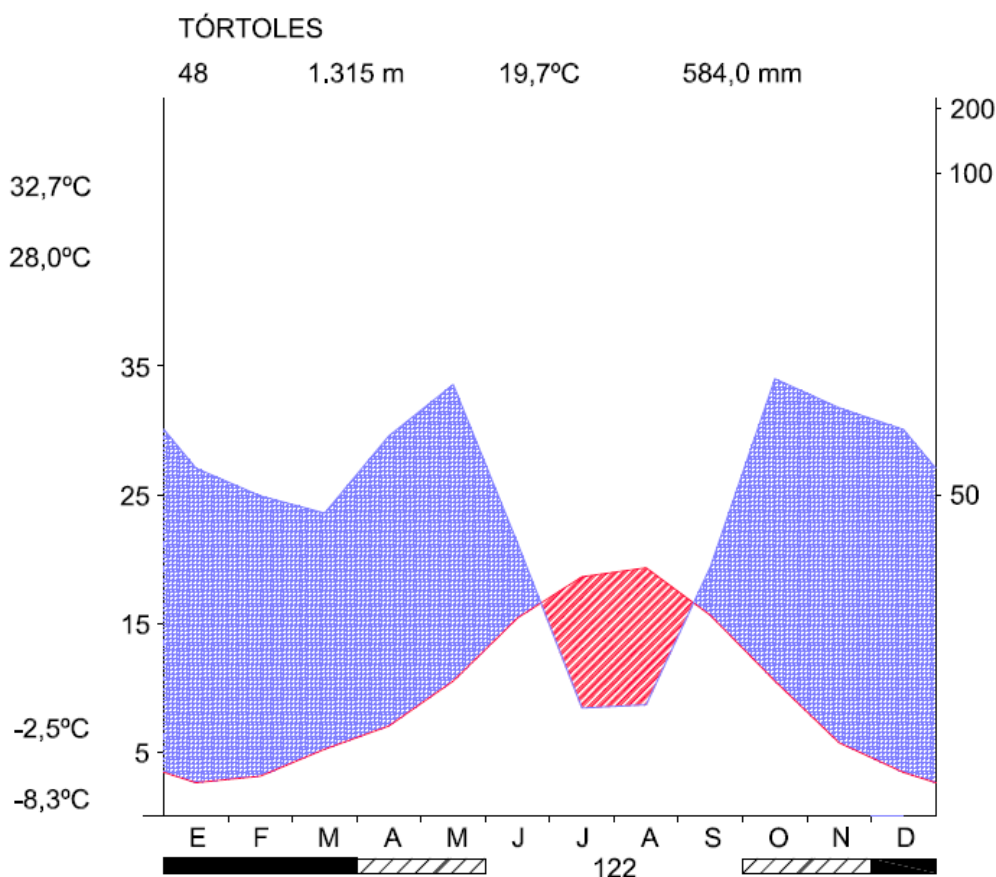


Figura 3.8. Climodiagrama de Walter y Lieth de la restauración de Tórtoles



Para caracterizar el clima siguiendo la clasificación fitoclimática de Allué (1990) se han determinado los siguientes parámetros, que en la zona de estudio toman los valores que se indican:

- La duración de la sequía: 2,37 meses
- La intensidad de la sequía: 0,091 (intensidad no muy acusada)
- La precipitación estival mínima mensual: 16,8 mm, registrada en el mes de agosto
- La precipitación media anual: 584,0 mm
- La temperatura media del mes más frío: 2,6 °C, registrada en enero.

Siguiendo a Allué (1990) el clima de la restauración de Tórtoles es de tipo IV₆: mediterráneo genuino moderadamente cálido menos seco. Este tipo climático se corresponde con una región fitoclimática xerofítica de inviernos frescos, que indica que la vegetación en el área de la restauración se caracteriza por estar adaptada a la sequía y no ser tolerante a temperaturas máximas muy elevadas.

La restauración de Tórtoles se encuentra en una latitud de 40°N, y el índice ombrotérmico del bimestre más seco del año es de 0,9, por lo que según Rivas-Martínez (1987), el clima de la restauración de Tórtoles está dentro del macrobioclima mediterráneo. El bioclima se corresponde con el mediterráneo pluviestacional-oceánico, debido a que el índice de continentalidad es de 16,7 y que el índice ombrotérmico anual vale 5,0 (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Índices para la clasificación climática de Rivas-Martínez (Elaboración propia a partir de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm)

Índice	Fórmula	Variables	Resultado
Ombrotérmico del bimestre más seco del año		<i>Pp2, Tp2</i> : precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) de los 2 meses consecutivos más secos del trimestre más seco, respectivamente	0,9
De continentalidad		<i>Tmáx</i> : temperatura media del mes más cálido (°C) <i>Tmín</i> : temperatura media del mes más frío (°C)	16,7 Oceánico, euoceánico atenuado
Ombrotérmico anual		<i>Pp</i> : suma de la precipitación mensual de los meses con <i>Tm</i> > 0 °C (mm) <i>Tp</i> : suma de las temperaturas medias mensuales > 0 °C, en décimas de grado (°C)	5,0 Subhúmedo inferior

El índice de mediterraneidad, que se calcula para aproximar las fronteras bioclimáticas mediterráneas y templadas, ha sido calculado a partir de los datos climáticos de la restauración, resultando los valores propios de la región mediterránea (Tabla 3.5).



Tabla 3.5. Índices de mediterraneidad: valores límite para la región mediterránea y valores para la restauración de Tórtoles

Índices	Región mediterránea	Restauración de Tórtoles
Im_1 (julio)	> 4,4	6,5
Im_2 (julio+agosto)	> 3,5	6,6
Im_3 (junio+julio+agosto)	> 2,5	4,0

En la restauración de Tórtoles, el índice de termicidad (Rivas-Martínez, 2004) toma el valor de 147,4, por lo que puede afirmarse que se encuentra en el piso bioclimático supramediterráneo superior, y que presenta un tipo de termicidad templado. Y en cuanto al ombrotipo, en la zona de estudio el índice ombrotérmico toma un valor de 5,0, por lo que se corresponde con el horizonte ómbrico subhúmedo inferior. Se han determinado otros índices climáticos y clasificaciones para caracterizar el clima de la restauración de Tórtoles. Se recogen en las Tablas 3.6 (índices generales) y 3.7 (índices mensuales).

Además, se ha calculado el índice de la UNEP (1997) para analizar la aridez, que para la zona de estudio toma un valor de 0,90 (>0,65), que se corresponde con un clima húmedo, aunque la precipitación anual es baja (584,0 mm).

Y por otro lado, la erosividad del clima se ha analizado con el índice de erosión pluvial o factor de erosividad del clima, R (Wischmeier & Smith, 1978). Este índice toma un valor de $86 \text{ hJ}\cdot\text{cm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ($860 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) para Tórtoles (MAGRAMA, 2014).

Por último, se ha determinado la ficha hídrica de Thornthwaite & Matter (1957) de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Tabla 3.8), en la que se ha utilizado una capacidad de retención de agua media de 201,1 mm, obtenida aplicando la fórmula de Gandullo (1985), y a partir de datos de cuatro calicatas realizadas en otras tantas zonas diferentes de la restauración (Cruz, 2011).

Para una mejor visualización de los resultados se ha realizado un gráfico que muestra los datos mensuales de *ETP*, reserva de agua del suelo, *ETRMP*, sequía fisiológica y drenaje (Figura 3.9). La *ETP* alcanza los mayores valores en el periodo estival, debido a que la sequedad ambiental y la elevada temperatura propician el bombeo de agua desde el suelo hacia la atmósfera. La *ETRMP* coincide con la *ETP* excepto en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, meses en los que las precipitaciones son mínimas y en los que la evapotranspiración queda limitada por la falta de agua. Es precisamente en estos meses cuando la reserva hídrica es mínima debido a que la vegetación emplea el agua retenida en el suelo para realizar la fotosíntesis. Los valores más críticos de sequía fisiológica se generan en el mes de agosto por agotamiento del agua del suelo. El drenaje de agua máximo hacia zonas más profundas se produce en el mes de febrero, cuando el suelo se encuentra repleto de agua por las lluvias otoñales y las tasas de evapotranspiración son mínimas causadas por el parón vegetativo de las plantas en época de bajas temperaturas.



Tabla 3.6. Índices y clasificaciones climáticas y su resultado para el clima de la restauración de Tórtoles

Índice o Clasificación	Fórmula	VARIABLES	Valor	Características del clima
Lang (1915)	—	<i>P</i> : precipitación anual media (mm) <i>T</i> : temperatura media anual (°C)	60,0	zona húmeda de estepa o sabana
Martonne (1926)	—	<i>P</i> : precipitación anual media (mm) <i>T</i> : temperatura media anual (°C)	29,6	Región húmeda
Dantín-Revenga (1941)	—	<i>P</i> : precipitación anual media (mm) <i>T</i> : temperatura media anual (°C)	1,7	Húmedo
Emberger (1932)	—	<i>P</i> : precipitación anual media (mm) <i>M</i> : temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C) <i>m</i> : temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)	75,1	Piso mediterráneo húmedo
Angstorm (1936)	—	<i>P</i> : precipitación anual media (mm) <i>T</i> : temperatura media anual (°C)	284,8	-
Setzer (Mongil, 2011)	—	<i>P_j</i> : precipitación media mensual (mm) <i>T_j</i> : temperatura media mensual (°C) <i>j</i> : mes	302,3	-
Vernet (1966)	— —	<i>H</i> : precipitación de la estación más lluviosa (mm) <i>h</i> : precipitación de la estación más seca (mm) <i>P</i> : precipitación media anual (mm) <i>P_v</i> : precipitación media estival (mm) <i>M_v</i> : temperatura media de las máximas del periodo estival (°C)	-7,2	Clima mediterráneo
Paterson (1956)	— — con —	<i>V</i> : temperatura media mensual del mes más cálido (°C) <i>A</i> : diferencia entre la media de las <i>T_{as}</i> máx. del mes más cálido y la media de las mín. del mes más frío (°C) <i>n</i> : nº de horas de insolación anual <i>P</i> : precipitación media anual (mm) <i>G</i> : duración del periodo vegetativo (meses)	105,6	-
Producción de madera (m³/ha·año)		<i>I</i> : índice de Patterson	3,3	-
Gandullo-Serrada (1977) (m³/ha·año)		<i>P_r</i> : producción de madera de Patterson <i>K</i> : factor de corrección para España según el tipo de roca (<i>K</i> = 1 para granito)	3,3	-
Rosenzweig (1968)		$\Sigma ETRMP$: evapotranspiración máxima posible anual de la ficha hídrica (mm)	2,8 (2,6–3,1)	-
PPNP(g materia seca·m⁻²·año⁻¹)		<i>log PPNP</i> : índice de Rosenzweig	670,8 (369,3-1218,3)	



Tabla 3.7. Índices climáticos mensuales y las clasificaciones asociadas para el clima de la restauración de Tórtoles

Mes	Índice de aridez mensual	Parámetro de Gausson (1954)		Parámetro de Birot (Mongil, 2011)	
Enero	51,6	5,1	Húmedo	-	-
Febrero	45,7	6,1	Húmedo	-	-
Marzo	37,2	10,4	Húmedo	27,2	Húmedo
Abril	41,7	14,0	Húmedo	34,4	Húmedo
Mayo	39,4	20,9	Húmedo	49,6	Húmedo
Junio	20,1	30,7	Húmedo	65,0	Seco
Julio	7,0	37,3	Seco	73,0	Muy seco
Agosto	7,1	38,6	Seco	67,5	Muy seco
Septiembre	18,2	31,2	Húmedo	53,2	Seco
Octubre	39,7	21,1	Húmedo	33,3	Muy húmedo
Noviembre	48,6	11,3	Húmedo	-	-
Diciembre	53,9	6,8	Húmedo	-	-

Tabla 3.8. Ficha hídrica de Thornthwaite & Matter (1957) para la restauración de Tórtoles

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TM (°C)	2,6	3,1	5,2	7,0	10,5	15,4	18,6	19,3	15,6	10,5	5,7	3,4
ETP (mm)	11,2	13,4	27,0	36,5	61,0	94,1	119,1	117,2	80,8	47,9	23,5	13,7
P (mm)	54,1	49,8	47,1	59,1	67,1	42,4	16,8	17,3	38,8	68,0	63,5	60,1
Reserva de agua en el suelo (mm)	195,4	201,1	201,1	201,1	201,1	155,5	93,5	56,9	46,2	66,2	106,2	152,6
ETRMP (mm)	11,2	13,4	27,0	36,5	61,0	88,0	78,8	53,8	49,5	47,9	23,5	13,7
Sequía fisiológica (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	40,3	63,4	31,3	0,0	0,0	0,0
Drenaje (mm)	0,0	30,7	20,1	22,6	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

TM= temperatura media; ETP= evapotranspiración potencial; P= precipitación media; ETRMP= evapotranspiración real máxima posible. Capacidad de retención de agua de 201,1 mm.

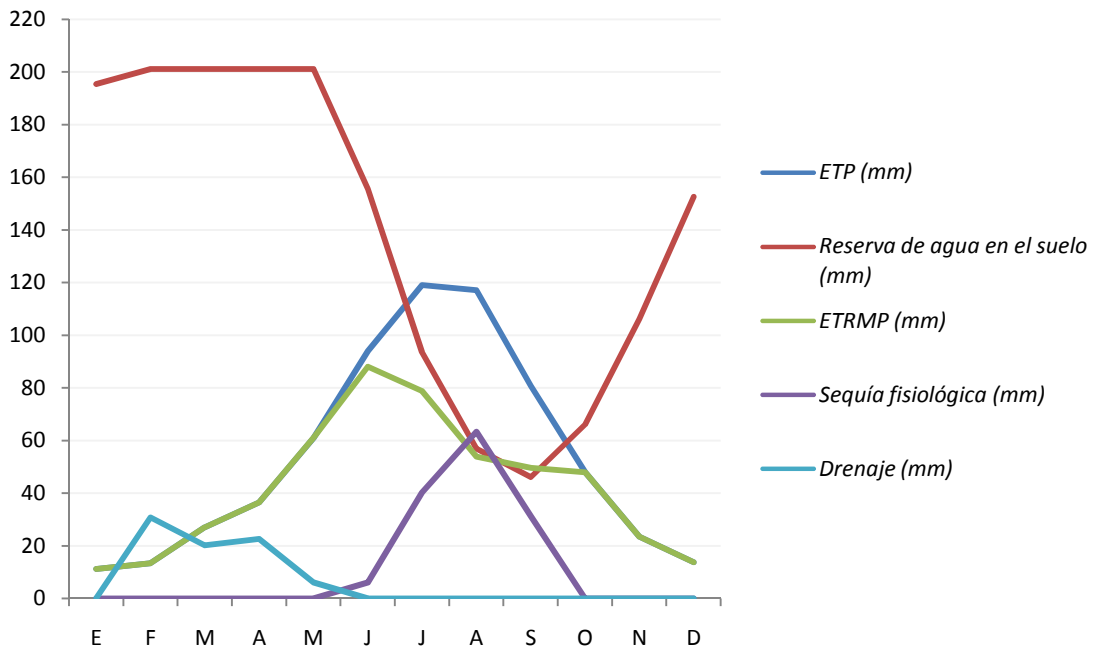


Figura 3.9. Representación de los resultados de la ficha hídrica de Thornthwaite & Matter (1957) para la restauración de Tórtoles. *ETP*= evapotranspiración potencial; *ETRMP*= evapotranspiración real máxima posible

De la ficha hídrica se deducen algunos índices anuales que caracterizan el clima de la zona de estudio (Tabla 3.9). El índice hídrico anual utilizado con frecuencia para delimitar zonas áridas informa mediante su clasificación asociada de que el área presenta un clima subhúmedo. La eficacia térmica del clima es de 645,4 mm, es decir, las condiciones climáticas en la restauración de Tórtoles son capaces de transportar a la atmósfera a través de la vegetación y mediante evaporación directa mayor cantidad de agua de la que precipita en la zona durante el año (584,0 mm). Sin embargo, esta capacidad evaporante se ve limitada por la escasez de agua en el periodo estival haciendo que la *ETRMP* anual media sea de 504,4 mm, con lo que la sequía fisiológica que sufren las plantas alcanza un valor de 141,0 mm, hecho que condiciona el establecimiento de especies hidrófilas. La concentración de las precipitaciones cuando la eficacia térmica del clima es menor permite la recarga de acuíferos y flujos de agua con 75,2 mm al año.

Tabla 3.9. Parámetros deducibles de la ficha hídrica

Eficacia térmica: $\sum ETP$ (mm)	645,5: Clima mesotérmico
Índice hídrico anual	8,5: Clima subhúmedo
Sequía fisiológica anual (mm)	136,6
<i>ETRMP</i> anual (mm)	508,8
Drenaje anual (mm)	75,2



3.1.2.4. Análisis de las precipitaciones máximas

Se ha realizado un análisis de las precipitaciones máximas diarias a partir de los datos de precipitaciones máximas diarias para la serie de años de 1966-2013, ajustados a la restauración de Tórtoles (Tabla 3.10). Se ha obtenido una precipitación media de 38,94 mm, con una desviación típica de 16,09 mm. A partir de estos datos se ha realizado el ajuste a la ecuación de Gumbel para estimar las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno.

Tabla 3.10. Precipitación máxima diaria anual (P_d) de la restauración de Tórtoles en el periodo 1966-2013

Año	P_d (mm)	Año	P_d (mm)
1966	56,8	1990	38,8
1967	33,5	1991	20,4
1968	24,6	1992	31,7
1969	41,4	1993	20,1
1970	29,3	1994	24,3
1971	74,3	1995	38,6
1972	63,3	1996	31,5
1973	43,9	1997	102,6
1974	32,9	1998	37,2
1975	43,6	1999	31,6
1976	47,6	2000	27,1
1977	34,8	2001	30,8
1978	24,6	2002	20,3
1979	78,9	2003	27,4
1980	43,1	2004	32,1
1981	42,4	2005	46,2
1982	60,6	2006	48,0
1983	37,1	2007	42,2
1984	39,2	2008	34,1
1985	38,5	2009	20,5
1986	31,7	2010	51,4
1987	35,0	2011	25,1
1988	23,2	2012	40,0
1989	40,3	2013	26,7



La función de Gumbel ajustada es la siguiente:

$$F(x) = e^{-e^{-0,0797 \cdot (P-31,7002)}}$$

Donde:

$$\alpha = 1,28255 \cdot \frac{1}{S} = 0,0797 \text{ mm}^{-1}$$

$$\mu = \bar{P} - \frac{0,5772}{\alpha} = 31,7002 \text{ mm}$$

$$\bar{P} = 38,94 \text{ mm}$$

$$S = 16,09 \text{ mm}$$

Para confirmar la bondad del ajuste realizado se plantea el test de Kolmogorov-Smirnov. Para ello se ordenan las precipitaciones máximas diarias de la serie de años anterior, de menor a mayor, y se calcula la frecuencia observada (F_{Ri}) mediante la fórmula de Weibull a través de la función de Gumbel obtenida anteriormente y el valor absoluto de la diferencia entre estas dos frecuencias. De esta última columna se toma el dato de mayor valor para comparar con el dato obtenido de la tabla de valores críticos de Kolmogorov-Smirnov para el test de bondad de ajuste (Tabla 3.11).

Se calcula el valor máximo del estadístico $|\Delta|$ (está señalado con negrita en la Tabla 3.11):

$$D_{m\acute{a}x} = \sup |\Delta| = 0,0897$$

Finalmente se compara este valor con $D(N, \alpha)$. $D(N, \alpha)$ se busca en la tabla de valores críticos de Kolmogorov-Smirnov, siendo α el nivel de significación (0,20):

$$D(N; \alpha) = D(48; 0,20) = \frac{1,07}{\sqrt{n}} = 0,154$$

Como $D_{m\acute{a}x} < 0,154$ se concluye que se admite el ajuste como válido, y por tanto, puede utilizarse la ecuación de Gumbel para estimar las precipitaciones máximas diarias para diferentes periodos de retorno.

Para ello se aplica la siguiente ecuación que relaciona el periodo de retorno con la función de distribución:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)}$$

Siendo:

$T(x)$ = periodo de retorno

$F(x)$ = función de Gumbel

Los datos obtenidos para los distintos periodos de retorno se muestran en la Tabla 3.12.



Tabla 3.11. Test de Kolmogorov-Smirnov para la restauración de Tórtoles en el periodo 1966-2013

<i>n</i>	<i>P_d</i>	<i>F_{Ri}</i>	<i>F(x)</i>	<i> Δ </i>	<i>n</i>	<i>P_d</i>	<i>F_{Ri}</i>	<i>F(x)</i>	<i> Δ </i>
1	20,1	0,0204	0,0801	0,0597	25	37,1	0,5102	0,5229	0,0126
2	20,3	0,0408	0,0835	0,0427	26	37,2	0,5306	0,5257	0,0049
3	20,4	0,0612	0,0852	0,0240	27	38,5	0,5510	0,5589	0,0079
4	20,5	0,0816	0,0870	0,0053	28	38,6	0,5714	0,5616	0,0098
5	23,2	0,1020	0,1400	0,0380	29	38,8	0,5918	0,5670	0,0249
6	24,3	0,1224	0,1639	0,0414	30	39,2	0,6122	0,5776	0,0346
7	24,6	0,1429	0,1713	0,0285	31	40,0	0,6327	0,5959	0,0368
8	24,6	0,1633	0,1713	0,0081	32	40,3	0,6531	0,6036	0,0495
9	25,1	0,1837	0,1841	0,0005	33	41,4	0,6735	0,6309	0,0426
10	26,7	0,2041	0,2247	0,0206	34	42,2	0,6939	0,6476	0,0463
11	27,1	0,2245	0,2360	0,0115	35	42,4	0,7143	0,6522	0,0620
12	27,4	0,2449	0,2445	0,0004	36	43,1	0,7347	0,6682	0,0665
13	29,3	0,2653	0,2976	0,0323	37	43,6	0,7551	0,6793	0,0758
14	30,8	0,2857	0,3401	0,0544	38	43,9	0,7755	0,6858	0,0897
15	31,5	0,3061	0,3616	0,0554	39	46,2	0,7959	0,7306	0,0653
16	31,6	0,3265	0,3646	0,0381	40	47,6	0,8163	0,7546	0,0618
17	31,7	0,3469	0,3677	0,0208	41	48,0	0,8367	0,7616	0,0752
18	31,7	0,3673	0,3677	0,0003	42	51,4	0,8571	0,8117	0,0454
19	32,1	0,3878	0,3800	0,0078	43	56,8	0,8776	0,8735	0,0040
20	32,9	0,4082	0,4045	0,0037	44	60,6	0,8980	0,9047	0,0068
21	33,5	0,4286	0,4197	0,0089	45	63,3	0,9184	0,9226	0,0042
22	34,1	0,4490	0,4379	0,0111	46	74,3	0,9388	0,9670	0,0282
23	34,8	0,4694	0,4588	0,0105	47	78,9	0,9592	0,9770	0,0178
24	35,0	0,4898	0,4648	0,0250	48	102,6	0,9796	0,9965	0,0169

n = número de orden de los individuos de la muestra.

P_d = precipitación máxima diaria (ordenadas de menor a mayor)

F_{Ri} = frecuencia observada, calculada por la fórmula de Weibull: $F_{Ri} = \frac{n}{N + 1}$

N = número total de individuos de la muestra

F(x) = frecuencia calculada por la función de Gumbel (sustituyendo *P_d* en la función de Gumbel)

|Δ| = valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia observada y calculada

Tabla 3.12. Precipitaciones (P) correspondientes a los distintos periodos de retorno (T) para la restauración de Tórtoles

T	P
5	50,5
10	59,9
50	80,6
100	89,4
500	109,6

3.1.3. GEOLOGÍA, LITOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El estudio geológico, litológico y geomorfológico está basado en la memoria del mapa geológico de la zona de estudio (IGME, 2008).

3.1.3.1. Geología y litología

La zona de estudio se localiza geológicamente en el Sistema Central, al sur de la Depresión del río Duero, que se formó durante la Orogenia Alpina del Terciario, y se apoya sobre un zócalo granítico formado durante el Hercínico. Posee una estructura fallada, con horsts y grabens, y sobre las líneas de falla se encajan los ríos, y en concreto el río Corneja, que drena el área de estudio. Los materiales dominantes en este sistema son los plutónicos y metamórficos, como los granitos, los gneis y las pizarras metamórficas. La litología dominante está formada por monzogranitos biotíticos porfídicos de grano grueso aunque en el norte del municipio también afloran granodioritas biotíticas de grano medio con megacristales de feldespato potásico. Tras la orogenia Hercínica, los granitos fueron denudados hasta configurarse una extensa superficie de erosión, posteriormente desnivelada por los movimientos alpinos que elevaron el Sistema Central. Actualmente presentan un aspecto meteorizado y alterado, formando bolos y canchales. La estructura compacta clásica del granito de las grandes masas únicamente se observa en los riscos, donde la roca aflora al exterior. Las rocas presentan caras planas de estructura tabular existiendo también, en menor medida, estructura esferoidal. Afloran asimismo sedimentos recientes, del Neógeno y del Cuaternario, que recubren parcialmente a los anteriores.

Desde el punto de vista tectónico y estructural, las rocas aflorantes en la zona se pueden dividir en dos conjuntos. El primero de ellos se extiende a la mayor parte de la superficie estudiada y está constituido por el zócalo que aparece deformado fundamentalmente por la Orogenia Hercínica. El segundo conjunto está formado por una cobertera de origen continental que se encuentra ubicada al noroeste y sur del municipio de Tórtoles. Ambos conjuntos se ven afectados posteriormente por la Orogenia Alpina. Como en el resto de la región, aparecen también fracturas tardías que se originaron al final de la Orogenia Hercínica, tras la cual se originaron deformaciones y se reactivaron las fallas anteriormente señaladas, a raíz de los

movimientos alpinos. Como en el resto del área, se producen movimientos en la vertical, y compartimentación en bloques que conlleva a la formación de cubetas (Figura 3.10), donde se sedimentarán los materiales procedentes de la denudación de los relieves colindantes. En los últimos episodios se produce el actual encajamiento de la red fluvial cuaternaria.

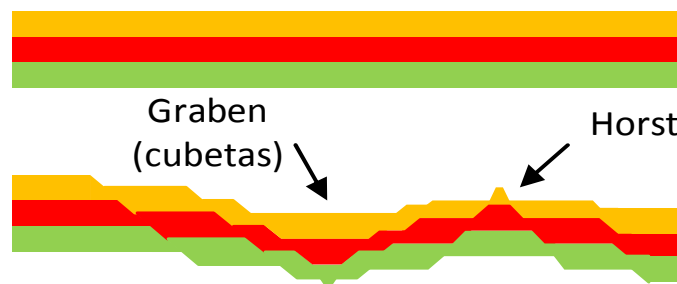


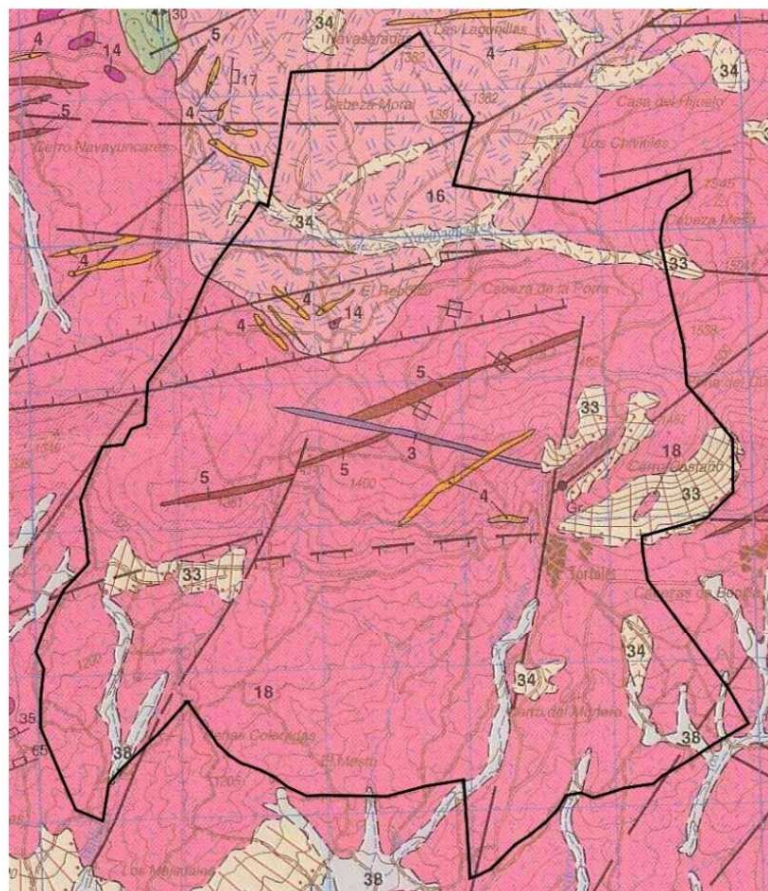
Figura 3.10. Estructura de graben y horst

Seguidamente se exponen las características más relevantes de cada una de las litologías presentes en la zona de estudio, de acuerdo con su historia geológica (IGME, 2008) (Figura 3.11):

- Rocas filonianas: rocas básicas e intermedias (3), y leucogranitos aplíticos con moscovita y cordierita (4). Las rocas básicas intermedias aparecen con morfología de dique al noreste de Tórtoles. Pertenecen a una variedad petrográfica que intruye a los monzogranitos biotíticos porfídicos, y se trata de una roca con textura porfídica formada por fenocristales de tamaño inferior a 3 milímetros, de plagioclasa, biotita, cuarzo y algunas formas integradas por agregados fibrosos de anfíbol verdoso. Este tipo de rocas corresponden a andesitas y/o andesitas basálticas biotítico anfibólica. Los leucogranitos aplíticos con moscovita y cordierita se sitúan también al noreste de la zona de estudio, y aparecen con morfología de dique o como pequeñas masas de geometría irregular, intruídas en granitos plutónicos. Son rocas de grano medio a fino, de color rosáceo o claro, con biotita, moscovita y localmente cordierita.
- Diques de pórfidos graníticos y/o granodioríticos (5): Estos diques se localizan preferentemente dentro de los afloramientos de monzogranitos biotíticos porfídicos de grano grueso en la zona de la restauración, y tienen una potencia de varios metros. De visu su aspecto es porfídico en el que se reconocen fenocristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y cordierita en una matriz holocristalina microgranuda de composición cuarzofeldespática. La composición mineralógica de estas rocas varía desde granítica a granodioríticas con pequeñas diferencias texturales en cuanto a tamaño de grano y densidad de fenocristales.
- Rocas básicas-intermediarias: gabros, dioritas y tonalitas (14). Se trata de rocas plutónicas que forman pequeñas masas de tamaño variable que aparecen distribuidas muy brevemente en la zona norte de la restauración. La composición de estos afloramientos es variable: gabros olivínicos, gabros

anfíbólicos, gabronoritas olivínicas, dioritas, cuarzdioritas y tonalitas. Predominan texturas granulares de grano medio.

- Granodioritas biotíticas de grano medio con megacrystalos de feldespato potásico (16): Afloramientos que aparecen al norte de la restauración, caracterizados por presentar un tamaño de grano medio ligeramente heterométrico en el que resaltan megacrystalos de feldespato potásico centimétricos formando una trama dispersa. Están compuestos por cuarzo (19-36%), plagioclasa (26-48%), feldespato potásico (1-26%) y biotita (11-28%), como minerales principales, y por moscovita, apatito, esfena, circón y opacos como minerales accesorios.



Rocas ígneas

- Gabros, dioritas y tonalitas
- Granodioritas biotíticas de grano medio con megacrystalos de feldespato potásico
- Monzogranitos biotíticos porfídicos de grano grueso

Sedimentos

- Arenas y limos con cantos y bloques (Coluviones)
- Arcilla, limos y arenas (Aluvial-coluvial)
- Limos, arenas y gravas (Fondo de valle)

Rocas filonianas

- 3. Diques de rocas básicas e intermedias
- 4. Diques de leucogranitos aplíticos biotíticos con moscovita y cordierita
- 5. Diques de pórfidos graníticos y/o granodioríticos

Signos convencionales

- Contacto intrusivo
- Contacto discordante
- Falla
- Falla supuesta
- Falla normal con indicación de hundimiento
- Falla normal con indicación de hundimiento supuesta

Figura 3.11. Mapa geológico del municipio de Tórtoles. Fuente: modificado de IGME (2008)



- Monzogranitos biotíticos porfídicos de grano grueso (18): Son rocas ígneas hercínicas, es decir, aquellas que tuvieron lugar durante el desarrollo de la Orogenia Hercínica. Constituyen la facies granítica más ampliamente representada en la zona estudio y ocupan una posición central dentro del macizo granítico que se prolonga hacia el Este. Las características distintivas, de visu, de esta variedad granítica respecto de las granodioritas, vienen marcadas fundamentalmente por su aspecto textural. Se trata de una roca de textura porfídica en la que resaltan megacrístales de 4 a 6 cm de longitud.
- Arenas y limos con cantos y bloques (33). Coluviones: Estos depósitos se generan principalmente al pie de las laderas y suelen estar relacionados con los materiales de los fondos de valle. Se presentan, en general, paralelos a los cursos de agua, formando bandas irregulares alargadas. Su composición es función de la litología del sustrato granítico, metamórfico o sedimentario, y su textura es heterométrica con frecuentes bloques cuando se desarrollan sobre materiales ígneos o metamórficos. Son depósitos poco coherentes, con una potencia variable entre 1 y 3 m.
- Arenas, limos y arenas (34). (Aluvial – coluvial): Estos materiales se encuentran dispersos en varios puntos del municipio, y ocupan zonas deprimidas relacionadas con la red fluvial. Poseen una morfología muy variable y se denominan así debido a que a los depósitos situados en el fondo del valle se les incorporan aportes laterales que proceden de las laderas. Por ello, su litología y textura es muy similar a la de los sedimentos de fondos aluviales. Se les asigna una edad Holocena.

3.1.3.2. Geomorfología

En Tórtoles se observa una divisoria de aguas que atraviesa el municipio en dirección este-oeste, de forma que a lo largo de ésta se encuentran las mayores altitudes, y en concreto la mayor de ellas en Coto Blanco, con 1.535 m de altitud, situado en la parte oriental, en el límite entre los términos municipales de Tórtoles y Bonilla de la Sierra (Figura 3.12). Al norte del municipio aparecen pendientes suaves, en general, hasta cotas inferiores a 1.300 m, mientras que en el sur predominan las fuertes pendientes. En el centro del término y en su parte occidental suceden una serie de gargantas y divisorias, mientras que la parte oriental concluye en pendientes menos marcadas, siendo la cota más baja del municipio 1.090 m (IGN, 2013).

La evolución geomorfológica de la zona comenzó en el pretriásico mediante el desarrollo de un potente perfil de alteración y de una superficie de sedimentación. Así, se formó una superficie “grabada” sobre la roca inalterada, que fue desnivelada y compartimentada debido a la elevación del Sistema Central, perdiendo su perfil de alteración en los bloques elevados. La incisión fluvial, canalizada en parte gracias a las fracturas existentes se iniciaría a la vez que la evolución geomorfológica. La ampliación de los valles redujo la extensión de las mesetas de la superficie grabada, que actualmente conservan su morfología original.

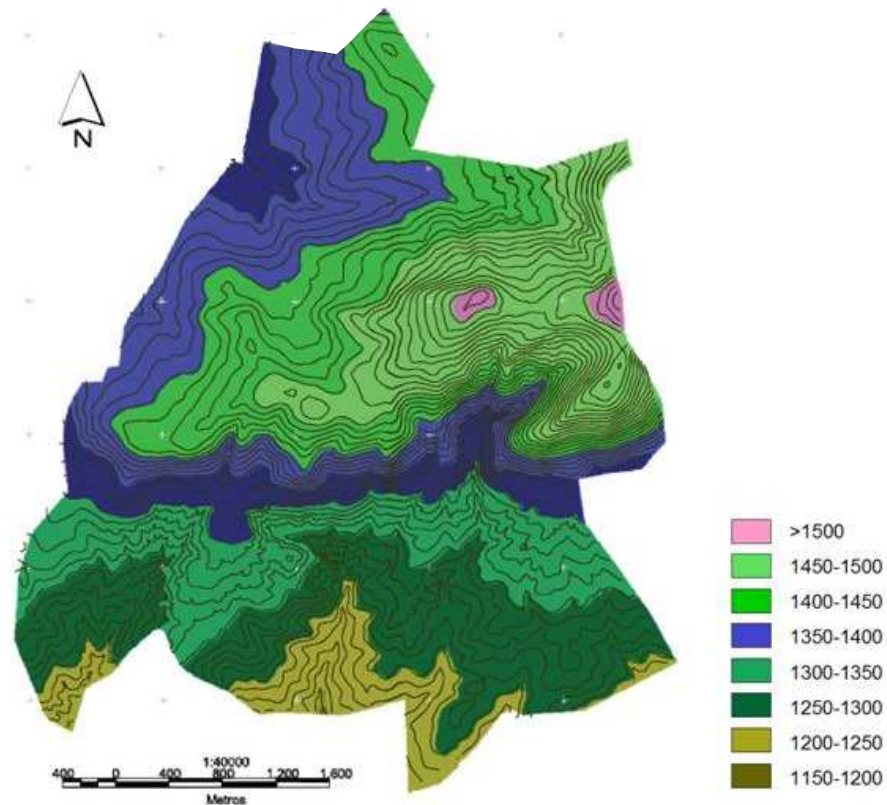


Figura 3.12. Altitud del terreno en el término municipal de Tórtoles

Los bloques que fueron hundidos por la tectónica alpina, y los que no se elevaron conservaron sus potentes perfiles de alteración y fueron cubiertos por sedimentos procedentes del desmantelamiento de las alteritas y regolitos de las zonas más elevadas.

Al Sur de Tórtoles se han identificado restos de otra superficie de erosión, equivalentes de la anterior, que se encuentra bajo la antigua superficie fundamental. En estos sectores también ocupan la cima plana de diversos interfluvios, que se sitúan a cotas más bajas sobre cauces presentes en la actualidad.

Actualmente impera la estabilidad morfológica en la zona, sin apenas incisión lateral ni movimiento de laderas, excepto por los procesos de reptación de coluviones en las laderas.

Como ya se ha indicado, en Tórtoles se localizan diversos planos de fractura, con fallas en dirección E-O con signos de hundimiento de uno de sus labios; y en dirección de N-S a NE-SO, el municipio se encuentra surcado por fallas horizontales marcando los principales cursos de agua. Hay que mencionar también los depósitos de origen aluvial-coluvial, que se encuentran en áreas deprimidas.

Por último, es necesario citar las formas del relieve de origen antrópico: las terrazas que se construyeron en la repoblación de 1965 para asegurar la viabilidad de los



árboles; y los bancales agrícolas que aparecen a las afueras del municipio, si bien hoy día la mayoría se encuentran abandonados.

3.1.4. EDAFOLOGÍA

Según el Mapa de Suelos de España (IGN, 2014), en la zona norte del término municipal de Tórtoles donde se encuentra la restauración, los suelos son inceptisoles, que de acuerdo con el USDA (2014a) se caracterizan por no tener materiales sulfhídricos dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral o bien por tener una o más de las siguientes características:

- Un horizonte cámbico que está dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral y tiene un límite inferior a una profundidad de 25 cm o más abajo de la superficie del suelo mineral.
- Un horizonte cálcico, petrocálcico, gypstico, petrogypstico, o plácico o un duripán dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral.
- Un fragipán o un horizonte óxico, sómbrico o espódico dentro de los 200 cm de la superficie del suelo mineral.
- Un horizonte sulfúrico dentro de los 150 cm de la superficie del suelo mineral.
- Un régimen de temperatura cryico o géllico y un horizonte cámbico

Dentro de los inceptisols se trata del suborden xerept, que son aquellos que tienen un régimen de humedad del suelo xérico, típico en las zonas de clima mediterráneo. La humedad, que se produce en el invierno cuando la evapotranspiración potencial es mínima, es particularmente efectiva para la lixiviación. La temperatura media anual del suelo es menor de 22 °C, y las temperaturas medias del suelo del verano y del invierno difieren en 6 °C o más a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo (USDA, 2014a). En este régimen de humedad el agua permanece en el suelo a lo largo del invierno. Suele haber otro máximo relativo de lluvias en primavera, pero la reserva de agua se agota pronto por la elevada evapotranspiración. Las lluvias durante el verano son poco frecuentes y, aunque son importantes por la cantidad de agua caída, son muy poco eficientes por su elevada intensidad. La mayor parte del agua de estas lluvias se pierde por escorrentía superficial. Al corresponder a un régimen no percolante, los suelos tienden a ser fértiles, siendo la falta de agua en la estación cálida, junto con la erosión, los condicionantes principales del suelo (Porta *et al.*, 2003).

En la zona sur del área de estudio los suelos son, en general, poco evolucionados, y pueden clasificarse como Entisoles, de acuerdo con la Soil Taxonomy (SSDS, 2010). Esta juventud o falta de evolución típica de los Entisoles es debida a los procesos erosivos desarrollados durante décadas en los lugares sin cubierta forestal densa. Sólo poseen un horizonte A óchrico, de escaso espesor, y/o un C, o incluso carecen de ellos. Se han formado por meteorización de la roca madre subyacente, sea ésta granito u otras rocas magmáticas, o coluviones procedentes precisamente de esa alteración. En general poseen más de un 70 % de arena, con texturas que van de franco-arcillo-arenosa a arenosa, y un pH alrededor de 6. Debido a las fuertes pendientes y a la existencia de fragmentos de roca el suborden correspondiente es Orthent. En aquellos

lugares en los que, gracias a la repoblación, se ha conseguido una cubierta forestal densa, estos Orthents evolucionan positivamente, debido sobre todo al aporte de materia orgánica y a unas condiciones de mayor humedad y menor insolación. Así, el horizonte A es cada vez de mayor espesor (>2 cm) y más oscuro, y con una capa por encima de restos vegetales en proceso de descomposición de más de 3 cm de espesor.

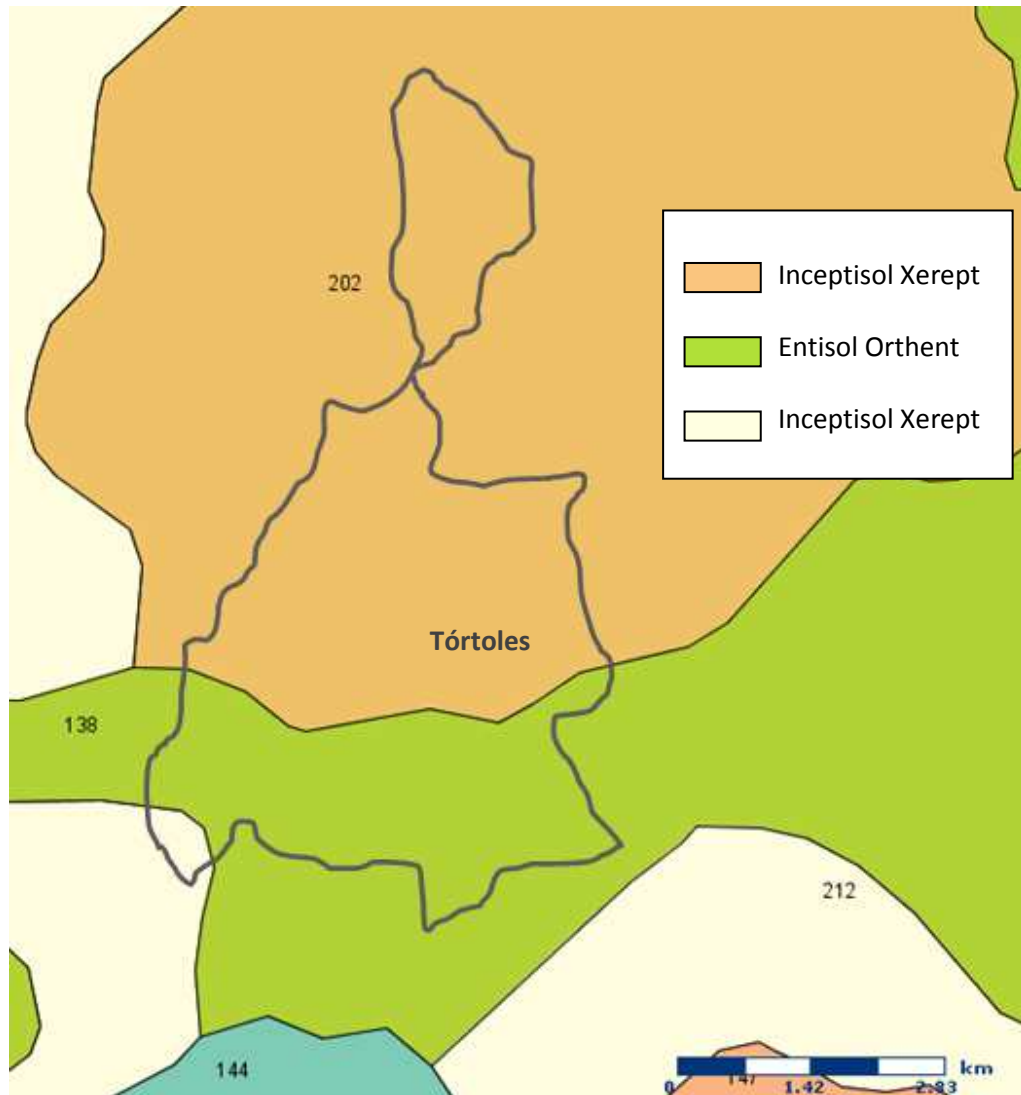


Figura 3.13. Mapa de suelos de la zona de estudio, escala 1:62.500 (IGN, 2014)

3.1.5. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

El río Corneja, en cuya cuenca se localiza nuestra área de estudio, se sitúa en la cuenca del Duero, y nace en su vertiente occidental. Es un afluente del río Tormes por su margen derecha, en el que desagua cerca del límite administrativo con la provincia de Salamanca, que a su vez es afluente del río Duero (Figura 3.14).

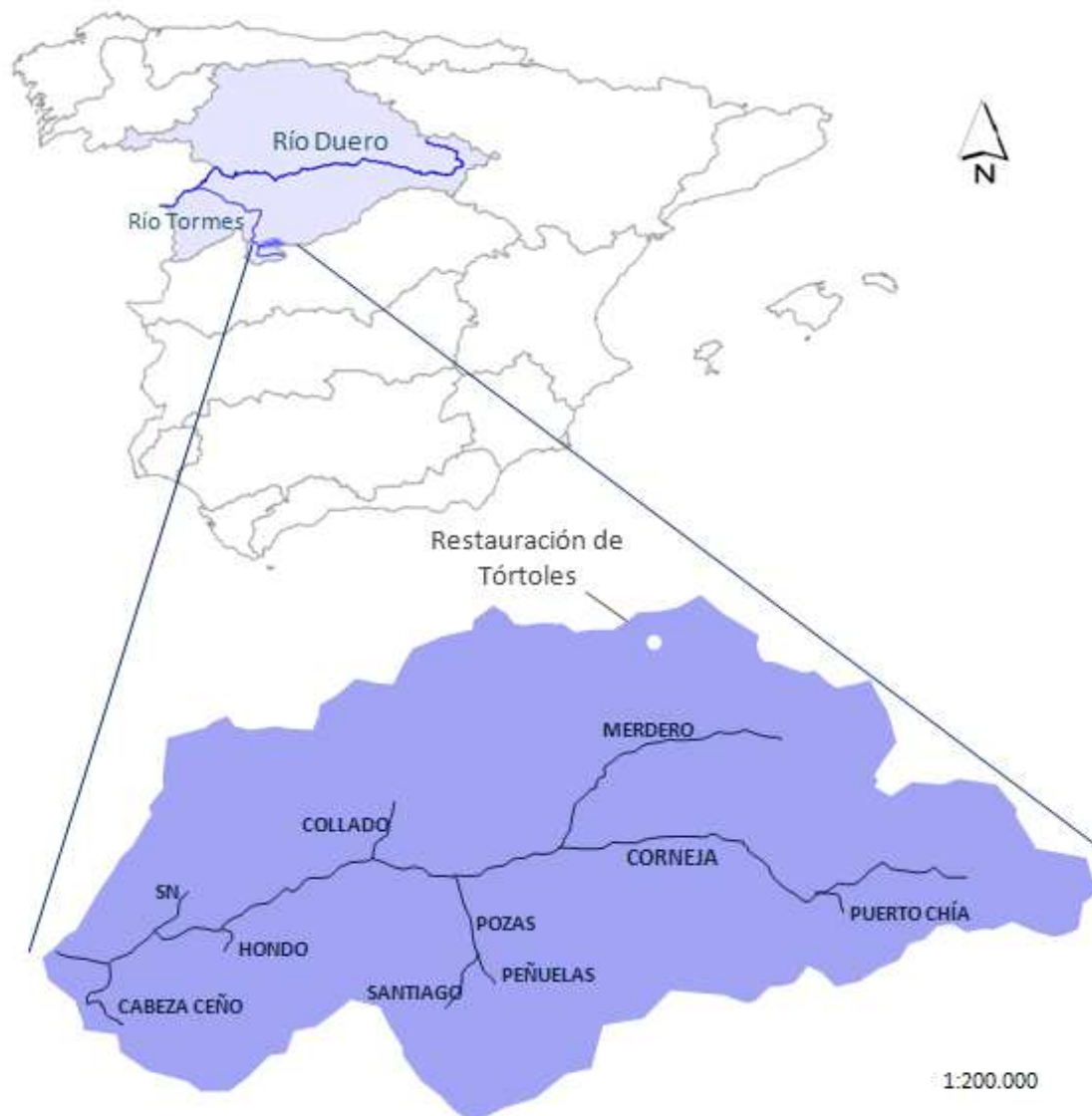


Figura 3.14. Localización de la cuenca del río Corneja dentro de la cuenca del Duero (arriba) y afluentes del río Corneja (abajo) (a partir de CHD, 2011b, 2011c)

La longitud del río Corneja es de 41,07 km, y la extensión de su cuenca, de 396,69 km², riega el Valle del Corneja. El río está protegido ambientalmente, al estar incluido en el LIC Riberas del Río Tormes y afluentes.

El río Corneja recoge por su margen derecha las aguas del arroyo de la Cruz del Valle, proveniente de Peña Pajarita, atraviesa las Chorreras, zona de cascadas, y pasa junto a la Garganta de los Hornos, conocida como La Aldea. Continúa circundando Navacepedilla del Corneja, recibiendo las aguas del arroyo Puerto Chía, del río de la Gargantilla (o arroyo Guareña) y del arroyo Pinarnegrillo, entre otros, por la margen izquierda, atraviesa el municipio de Villafranca de la Sierra, y posteriormente el de Villar de Corneja, lugar en el que desaparece en unos arenales donde transcurre como agua subterránea para reaparecer a la superficie y desembocar en el río Tormes, en el término municipal de La Horcajada (Ávila).

En la actualidad, de acuerdo con la Orden Anual de Pesca de 2014, el río Corneja está acotado a la pesca deportiva. Posee una veda total desde su nacimiento hasta el azud de la regadera situado aguas abajo del puente de la N-110, en el límite de los términos municipales de Bonilla de la Sierra y San Miguel de Corneja. Además, es una reserva muy importante de la trucha común (*Salmo trutta morpha fario*).

Este río posee numerosos arroyos tributarios, entre los cuáles se mencionan los que circulan por las laderas del término municipal de Tórtoles, cuya disposición se puede observar en la Figura 3.15:

- Arroyo del Maíllo
- Arroyo de Valdenegro (al confluir con el Maíllo se forma el río de Bonilla, que desemboca en el río Corneja)
- Arroyo del Palancar (desemboca en el arroyo Valdenegro)
- Arroyo del Convento (es afluente del arroyo Merdero, que desemboca en el arroyo de Valdenegro)

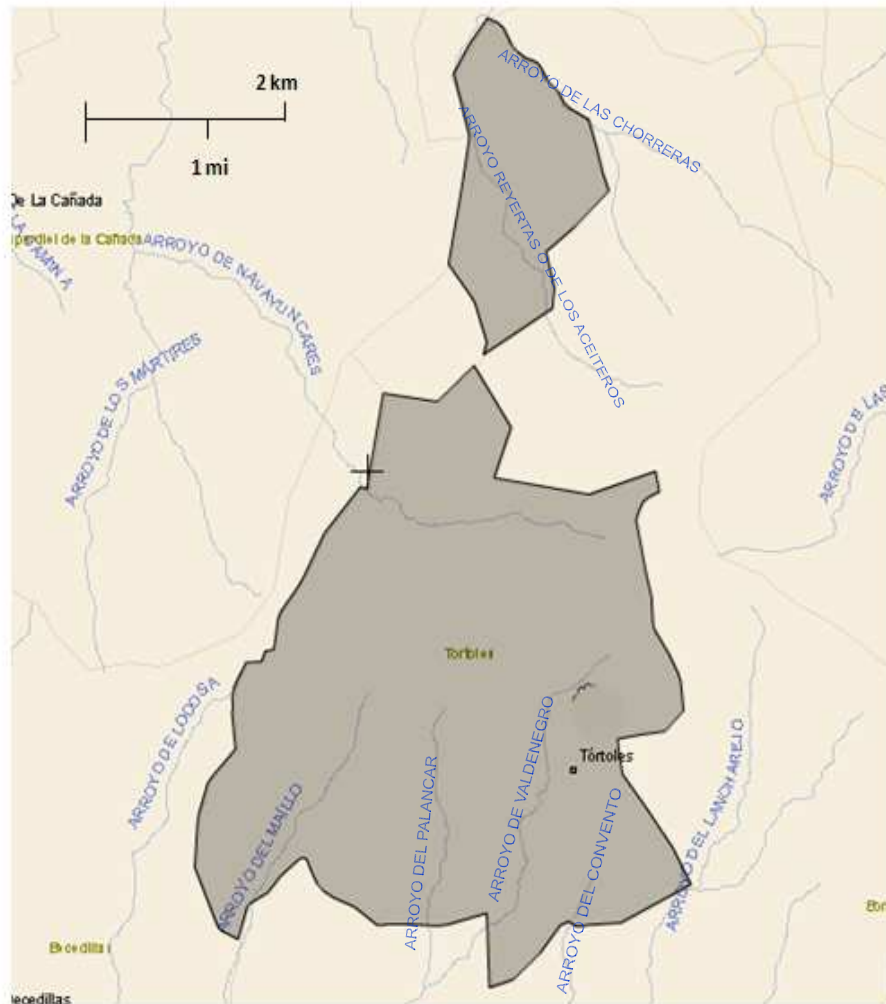


Figura 3.15. Red de drenaje de la zona de estudio (Elaboración propia a partir de IGN (2011))



Las cárcavas de la restauración que pertenecen a la zona de estudio vierten a estos arroyos tributarios, aunque existen otros arroyos que discurren por el término municipal, que no pertenecen a la cuenca del río Corneja, sino que desembocan directamente en el río Tormes:

- Arroyo de Navayuncares (que desemboca en el río Tormes)
- Arroyo Reyertas o de los Aceiteros (tributario del río Agudín, afluente del río Gamo, también de la subcuenca del Tormes)
- Arroyo de las Chorreras (también tributario del río Agudín, afluente del río Gamo, también de la subcuenca del Tormes)

La aportación media del río Corneja es de $51,90 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, y su aportación específica es de $0,13 \text{ hm}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$. De acuerdo con los datos que aporta la Confederación Hidrográfica del Duero para la serie de años de 1941 a 2005, el tramo del río Corneja desde su cabecera hasta la confluencia con el río Pozas (afluente del río Corneja que discurre por el término municipal de Piedrahíta), y arroyo de Puerto Chía (tramo correspondiente a la zona de estudio) tiene una aportación media de $52,96 \text{ hm}^3$. En la Figura 3.16 se pueden observar, gráficamente representadas, las aportaciones medias anuales, para la serie de años señalada.

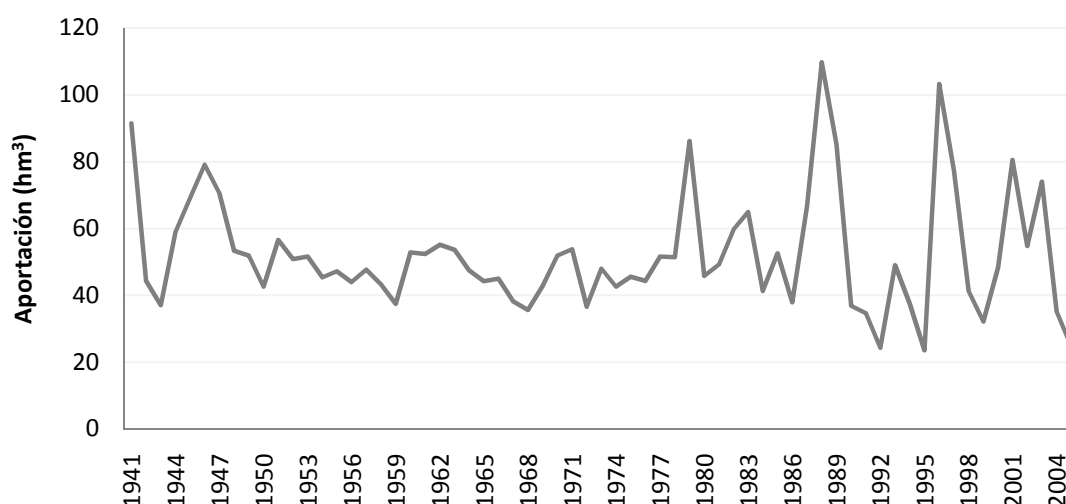


Figura 3.16. Aportación media anual (hm^3) del río Corneja en el tramo de estudio para la serie de años de 1941 a 2005 (CHD, 2011a)

La aportación máxima se registró en 1988, con $109,68 \text{ hm}^3$, y la mínima en 1995, con un valor de $23,53 \text{ hm}^3$. En la gráfica del año medio (Figura 3.17) se observa que la mayor aportación se registra en el mes de noviembre, con $5,73 \text{ hm}^3$, seguido por los meses de diciembre, enero y marzo. El régimen es, por tanto, pluvionival, y no está regulado, ya que no existe ninguna gran presa aguas arriba, si bien se encuentran algunos azudes de antiguos molinos, y uno de más reciente construcción junto al puente de la carretera que comunica las localidades de Navacedilla del Corneja y Garganta de los Hornos. Aguas abajo, en el río Tormes, es de destacar la presa de Santa Teresa construida en 1960, cuya capacidad no se ha visto mermada por el aporte

de sedimentos, al menos en parte, gracias a la restauración hidrológico-forestal llevada a cabo en la zona de estudio.

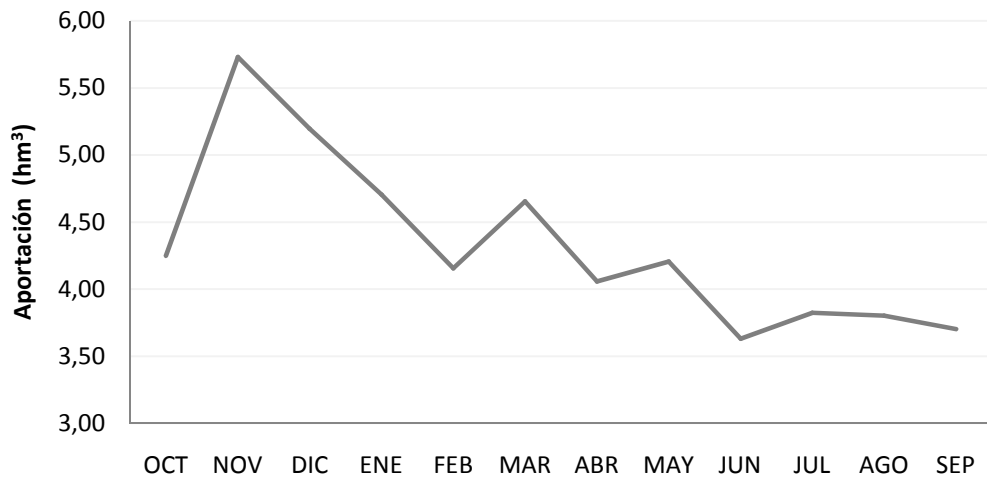


Figura 3.17. Aportación del año medio del río Corneja (hm^3) en el tramo de estudio para la serie de años de 1941 a 2005 (CHD, 2011a)

Si se realiza un estudio por estaciones (Figura 3.18), el invierno es la estación en la que se observa una mayor aportación, seguida por el otoño, y el verano y la primavera son las estaciones que registran los valores más bajos.

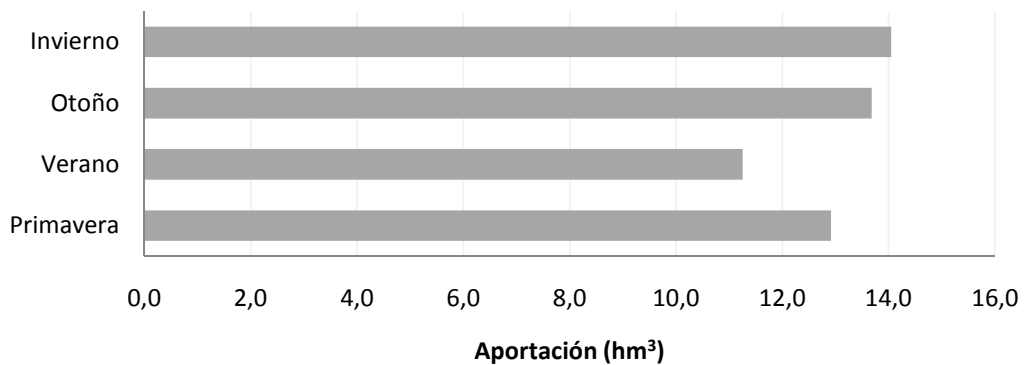


Figura 3.18. Aportación estacional del año medio del río Corneja, en el tramo de estudio para la serie de años de 1941 a 2005 (CHD, 2011a)

Aguas abajo de la restauración se localizan varias presas que pueden sufrir una merma de su capacidad debido a la recepción de sedimentos, así como estaciones que ofrecen información sobre la calidad de las aguas que circulan a través de ellas.

En cuanto a las presas, ordenadas de aguas arriba a aguas abajo, se localizan las siguientes: la presa de Puente del Congosto, el Salto de San Fernando y el embalse de Santa Teresa (Figura 3.19), todas ellas ubicadas en el río Tormes, que nace en la Sierra de Gredos y desemboca en el río Duero. Al norte de la zona de la restauración se encuentra la presa de Zapardiel de la Cañada, situada en el arroyo de las Pasaderas; sin

embargo, las aguas de este arroyo no transcurren por el área de la restauración en ningún momento, si no que vierten en el río Tormes, por lo que no resulta relevante para este estudio.



Figura 3.19. Localización de las presas y estaciones de calidad cercanas al área de la restauración de Tórtoles (Escala 1:250.000) (CHD, 2014a)

La presa de Puente del Congosto, situada tras la confluencia del río Corneja con el río Tormes, realiza un aprovechamiento hidroeléctrico de las aguas de este último, con un salto bruto de 11,37 m (CHD, 2014b).

La presa Salto de San Fernando se encuentra entre los municipios de Cespadosa de Tormes y Santibáñez de Béjar, y realiza un aprovechamiento hidroeléctrico de las aguas del río Tormes. Recibe un caudal medio anual de 835 hm³ y su capacidad es de 1,15 hm³.

El embalse de Santa Teresa, situado al sur de la provincia de Salamanca, posee una capacidad de 496 millones de m³, convirtiéndose así en el segundo más grande de la cuenca del Duero de titularidad estatal, después del embalse de Riaño. La explotación del embalse a través de su presa (Figura 3.20) comenzó en 1961, cuyos usos principales son el de abastecimiento, suministrando agua potable a muchas localidades, entre ellas Salamanca; el riego, a una superficie de 65.000 ha; y el aprovechamiento hidroeléctrico, con una potencia instalada de 21.000 kW (CHD, 2014b). En la Tabla 3.13 se indican las características hidrológicas, así como los datos del embalse y de la presa del mismo nombre.



Figura 3.20. Vista aérea (izquierda) y planta (derecha) de la presa de Santa Teresa (CHD, 2014b)

Tabla 3.13. Datos hidrológicos, y datos del embalse de Santa Teresa (CHD, 2014b)

DATOS HIDROLÓGICOS	
Superficie de la cuenca	1.853,0 km ²
Aportación media anual	900,0 hm ³
Caudal punta avenida (proyecto)	2.050 m ³ ·s ⁻¹
DATOS DEL EMBALSE	
Superficie	2.579,0 ha
Capacidad	496,0 hm ³
Cota	885,7 m
DATOS DE LA PRESA	
Tipo de presa	Gravedad
Cota de cimentación	827,2 m
Altura desde cimientos	60,0 m
Altura desde cauce	54,5 m
Longitud de coronación	517,0 m
Volumen total del cuerpo de la presa	385.570,0 m ³

En cuanto a las estaciones de calidad de las aguas y de acuerdo con los datos proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD, 2014c), en la estación Puente del Congosto se han detectado una media de 3,27 mg·L⁻¹ de sólidos en suspensión en las aguas, para la serie de años de 2001 a 2010, periodo en el que inicialmente sigue una tendencia descendente, con un leve aumento entre 2008 y 2009 (Figura 3.21) dentro de la normalidad y propio de aguas que sufren poca erosión, siendo un indicativo de la aptitud para aguas piscícolas.

Los datos de la calidad de las aguas que llegan al embalse de Santa Teresa muestran la misma tendencia que los proporcionados por la estación de Puente del Congosto en cuanto a los sólidos en suspensión presentes en las muestras, para la serie de años 2001-2010 (Figura 3.22), con una media de 5,69 mg·L⁻¹ de sólidos en suspensión en las aguas. El límite máximo de sólidos en suspensión admitido por la Directiva Europea Marco del Agua (UE, 2000) para las aguas de salmónidos es de 25 mg·L⁻¹, por lo que se trata de aguas aptas para estas especies en ese periodo de años, aunque con anterioridad al proyecto de restauración fueran patentes grandes arrastres de sedimentos que sufría la zona de estudio (Azcarretazábal, 1964).

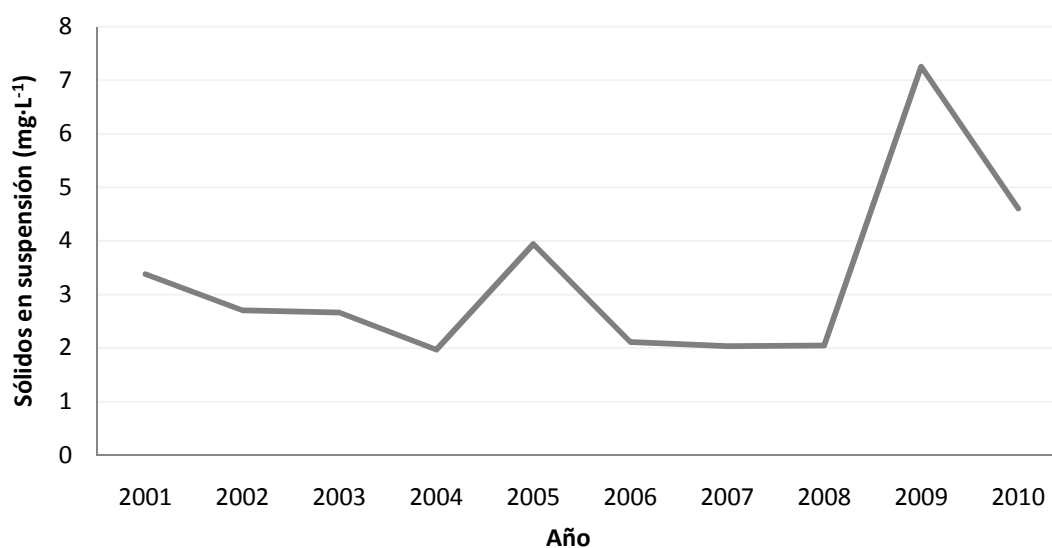


Figura 3.21. Sólidos en suspensión presentes en las muestras tomadas en la estación de Puente del Congosto con el fin de determinar la calidad de las aguas (CHD, 2014c)

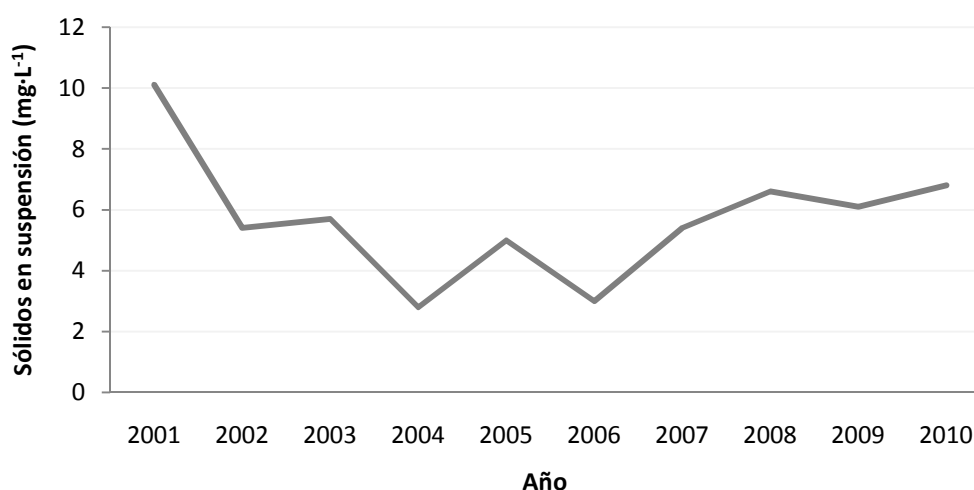


Figura 3.22. Sólidos en suspensión presentes en las muestras tomadas en la estación del embalse de Santa Teresa con el fin de determinar la calidad de las aguas (CHD, 2014c)

De Vente (2009) realizó un estudio batimétrico de 61 embalses españoles, entre los que se encuentra el embalse de Santa Teresa, y estimó que la tasa de sedimentos que recibe es de $339 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ (Tabla 3.14). Según sus datos, más de 628.000 t llegaban cada año al embalse en el periodo 1960-1989, lo cual suponía una merma progresiva de su capacidad, merma que se puede reducir a través de actuaciones que permiten minorar la pérdida de materiales y su emisión aguas abajo, como la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles.

La situación hidrogeológica de Tórtoles queda definida por su situación al sur de la unidad hidrogeológica de Ciudad Rodrigo-Salamanca, al oeste de la fosa tectónica del valle Ambles y parcialmente incluido en la unidad del Corneja. Además, Tórtoles se encuentra sobre la masa de agua subterránea del horizonte inferior de Gredos.



Tabla 3.14. Datos de producción de sedimentos del Embalse de Santa Teresa, obtenidos a partir de análisis batimétricos (modificado de De Vente, 2009)

Tasa de producción de sedimentos	628.004 t · año ⁻¹
Periodo	1960-1989
Área de la cuenca de aportación de sedimentos	1.853 km ² (18,53 ha)
Tasa de producción de sedimentos por área	33.891,2 t · ha · año ⁻¹

Las rocas aflorantes pueden ser divididas en dos conjuntos para su estudio hidrogeológico:

- Materiales plutónicos: su naturaleza es considerada impermeable, excepto por fracturación o por alteración superficial, por lo que proporcionan caudales reducidos. Se distribuyen por la mayor parte del territorio de Tórtoles. En algunas de las laderas restauradas estos granitos se encuentran alterados a arenas arcósicas constituyendo un lehm granítico¹, con un espesor muy variable de hasta 15 m en algunos puntos. Este lehm se puede considerar como un acuífero de interés local, con una permeabilidad baja-media asociada a la porosidad intergranular.
- Sedimentos detríticos de origen continental: están constituidos por arcosas y arenas con cantos de permeabilidad media-alta debido a porosidad intergranular. Los depósitos del Cuaternario aluvial del arroyo Valdenegro, cauce principal de la restauración, pueden llegar a los 3-4 m de potencia. Las facies permeables se cargan por infiltración del agua de lluvia y por escorrentía superficial. Las áreas de contacto entre materiales permeables e impermeables actúan como zonas de recarga, generando escorrentía subsuperficial.

Los flujos subterráneos presentan una dirección NE-SO en la zona de la restauración, y se producen desde los bordes impermeables de la cuenca hacia el río (zona de descarga).

Respecto a su naturaleza química, el agua subterránea se caracteriza por ser bicarbonatada cálcico-magnésica o bicarbonatada magnésico-cálcica. Son aguas blandas, poco mineralizadas, aptas para el consumo humano y el uso agrícola.

3.1.6. VEGETACIÓN

El estudio del estado de la vegetación previo a la restauración y de su estado actual es necesario para comprender las actuaciones llevadas a cabo a través de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles, ya que entre otras muchas implicaciones, la vegetación es estabilizadora de pendientes, reduce la erosión e influye en la regulación del ciclo hidrológico.

¹ Lehm granítico: arena resultante de la meteorización química de las micas y feldespatos del granito.



3.1.6.1. Vegetación del entorno

A continuación se expone la clasificación biogeográfica y bioclimática, y la vegetación potencial de la zona de estudio.

Clasificación biogeográfica y bioclimática

De acuerdo con la Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España (Rivas-Martínez, 1987), la clasificación biogeográfica de la zona de estudio es la que se muestra en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Clasificación biogeográfica de la zona de estudio (Rivas-Martínez, 1987)

Reino	Holártico
Región	Mediterránea
Subregión	Mediterráneo Occidental
Superprovincia	Mediterráneo Ibero-Atlántica
Provincia	Carpetano-Ibérico-Leonesa
Sector	Bejarano-Gredense
Subsector	Bejarano-Gredense
Distrito	Cornejano-amblense

Vegetación potencial

Las condiciones termopluviométricas, junto con la orografía, los suelos y especialmente el factor humano, son las variables que definen la serie de vegetación existente en la zona de estudio.

Según Rivas-Martínez (1987), a la zona de estudio le corresponde la serie 24a: Serie supra-mesomediterránea guadarrámica ibérico-soriana celtibérico- alcarreña y leonesa silicícola de *Quercus rotundifolia* (actualmente *Quercus ilex* ssp. *ballota*) o encina. El nombre fitosociológico de esta serie es *Junipero oxycedri- Querceto rotundifoliae sigmetum*, y su vegetación potencial se corresponde con los encinares. Sin embargo, a las zonas altas, a partir de los 1.350 m de altitud, les corresponde la serie 18a: Serie supramediterránea carpetano-ibérico-leonesa y alcarreña subhúmeda silicícola de *Quercus pyrenaica* o roble melojo. El nombre fitosociológico de esta serie es *Luzulo forsteri-Querceto pyrenaicae sigmetum*, con vegetación potencial de rebollares. Esta serie abarca el cuadrante nororiental del municipio de Tórtoles. En la Tabla 3.16 se muestran las especies dominantes de las series indicadas, representadas espacialmente en la Figura 3.23.

Tabla 3.16. Etapas de regresión y bioindicadores de las Serie 24 a (Rivas-Martínez, 1987)

Nombre de la serie	24a. Guadarrámico-Ibérica (supra-meso) silicícola de la encina	18a. Carpetano-ibérico-alcarreña subhúmeda del melojo
Árbol dominante	<i>Quercus rotundifolia</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>
Nombre fitosociológico	<i>Junipero oxycedri-Querceto rotundifoliae sigmetum</i>	<i>Luzulo-Querceto pyrenaicae sigmetum</i>
I. Bosque	<i>Quercus rotundifolia</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>
	<i>Juniperus oxycedrus</i>	<i>Luzula forsteri</i>
	<i>Lonicera etrusca</i>	<i>Physospermum cornubiense</i>
	<i>Paeonia broteroi</i>	<i>Geum sylvaticum</i>
II. Matorral denso	<i>Cytisus scoparius</i>	<i>Cytisus scoparius</i>
	<i>Retama sphaerocarpa</i>	<i>Genista florida</i>
	<i>Genista cinerascens</i>	<i>Genista cinerascens</i>
	<i>Adenocarpus aureus</i>	<i>Adenocarpus hispanicus</i>
III. Matorral degradado	<i>Cistus ladanifer</i>	<i>Cistus laurifolius</i>
	<i>Lavandula pedunculata</i>	<i>Lavandula pedunculata</i>
	<i>Rosmarinus officinalis</i>	<i>Arctostaphylos crassifolia</i>
	<i>Helichrysum serotinum</i>	<i>Santolina rosmarinifolia</i>
IV. Pastizales	<i>Stipa gigantea</i>	<i>Stipa gigantea</i>
	<i>Agrostis castellana</i>	<i>Agrostis castellana</i>
	<i>Poa bulbosa</i>	<i>Trisetum ovatum</i>

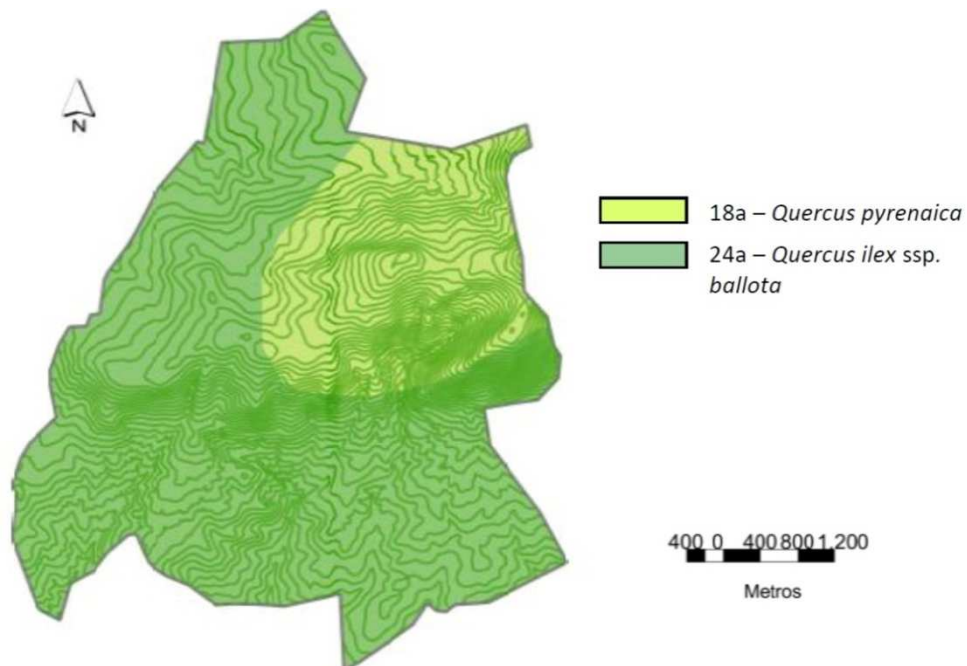


Figura 3.23. Series de vegetación del municipio de Tórtoles



3.1.6.2. Evolución histórica de la restauración hidrológico-forestal dentro de la cuenca del río Corneja

El estudio de la evolución histórica que se expone a continuación está basado en Mongil *et al.* (2013)².

Hasta hace unos ciento cincuenta años, las laderas que conforman la cabecera de la cuenca del río Corneja estuvieron pobladas por bosques densos de encina y, en las cotas más altas, de roble (Barranco, 1997; Del Ser, 1998; Génova *et al.*, 2009). Sin embargo la gestión tradicional de estos montes, carente de una normativa eficaz de conservación de los recursos forestales, implicó su destrucción casi completa. Este no es un hecho aislado en la zona, ya que en la vecina sierra de Gredos, la acción antrópica deforestadora, fundamentalmente para el establecimiento de pastos y cultivos, es un proceso secular (Génova *et al.*, 2009; Cantero, 2003). La proliferación de cárcavas y arrastres de sólidos hacia los cauces, movió a la Administración hidrológica a recuperar la cubierta forestal (Azcarretazábal, 1964), especialmente debido a la construcción aguas abajo de la presa de Santa Teresa en 1960.

Para caracterizar la zona de la restauración en su estado inicial degradado y poder compararlo con el estado actual, desde el punto de vista de la dinámica erosiva y de la vegetación, se han utilizado las siguientes fuentes de información: Catastro del Marqués de la Ensenada (1750-1760); Diccionario Geográfico-Estadístico de Madoz (1845-1850); catálogos antiguos de montes de utilidad pública, en concreto se han consultado la Clasificación de Montes Públicos Exceptuados de Desamortización (1859) (ICONA, 1990), el Catálogo de los Montes Públicos Exceptuados de la Desamortización (1862) (ICONA, 1991), el Catálogo de los Montes y demás Terrenos Forestales Exceptuados de la Desamortización por Razones de Utilidad Pública (1901) (ICONA, 1993), y el actual Catálogo de Montes de Utilidad Pública (JCYL, 2001); fotografías aéreas (1945, 1956, 1977, 1984 y 2002); proyectos de restauración de la Confederación Hidrográfica del Duero (entre 1964 y 1971), con una buena colección de fotografías anteriores a la restauración; y fotografías actuales realizadas en los recorridos efectuados en campo.

En la Tabla 3.17 se realiza una síntesis de la evolución de la cubierta forestal de la zona alta y media de la cuenca del río Corneja, centrada en los municipios de Tórtoles, Bonilla de la Sierra, con sus anejos de Cabezas de Bonilla y Pajarejos, y Casas del Puerto de Villatoro. Se sabe que los pueblos prehistóricos que habitaban la zona se dedicaban a la agricultura y la ganadería. Existen vestigios también de la época romana y visigoda, periodos en los que la actual Bonilla de la Sierra era un asentamiento de cierta importancia. Esta villa fue tomada por el conde castellano Fernán González a los sarracenos en 981 d.C., por lo que en aquel momento debía constituir una población estable (Barranco, 1997). Las políticas de repoblación en el Valle del Corneja se basaron en el afianzamiento de los núcleos ya existentes y no en la creación de otros nuevos, de manera que en 1209 se calcula que Bonilla tendría cerca de 200 habitantes.

² La autora de la tesis es coautora de esta publicación.



Tabla 3.17. Evolución histórica de la cubierta forestal de la zona alta y media de la cuenca del río Corneja (Mongil *et al.*, 2013)

FECHA	FUENTE	REFERENCIAS
1295	Del Ser (1998) Génova <i>et al.</i> (2009)	El concejo de Bonilla compra una moheda, y se menciona el topónimo "Navalpinareda", que podría indicar la presencia de pinos.
Principios s. XIV	Barranco (1997)	Mención a los rebollares, dehesas, ejidos, mohedas, baldíos y laderas
s. XIV	Libro de la Montería Génova <i>et al.</i> (2009)	Topónimo "Pinareio" en el Valle del Corneja, que podría indicar la presencia de pinos.
s. XIV	Barranco (1993)	En la sierra de Villanueva (al este de la zona de estudio) el suelo está muy erosionado por las muchas roturaciones y la escorrentía
1500-1565	Barranco (1997)	Ordenanzas con preocupación por la conservación de los montes. Se prohíbe la corta de encinas y robles en determinados lugares
1750	Catastro de Ensenada	"Monte alto propio de la villa de Bonilla, sus arrabales y aldeas de su tierra y jurisdicción todo poblado de encinas" de 804 fanegas (aprox. 586 ha), en el que se aprovecha la leña y la bellota. Dehesa de pastos de 246 fanegas (unas 172 ha). Aún hay una masa forestal importante.
1850	Diccionario Madoz (Madoz, 1850)	Tórtoles: "monte de encinas el cual se labra" Cabezas de Bonilla: "un monte con arbolado de encina, una alameda de álamos llamados chopos" Pajarejos: "un pequeño monte de encina" En Bonilla no se cita monte, posiblemente por encontrarse ya muy degradado.
1859	Clasificación de montes públicos (ICONA, 1990)	Tórtoles: Exceptuados: "Jara", 70 ha, encina, roble. "Dehesa Boyal", 20 ha, roble, roble; Enajenables: "El Monte", encina, roble Bonilla: Exceptuados: Los Majadales y Moheda, 300 ha, encina, roble; Enajenables: Majadas y Mohedas, 300 ha, encina, roble (es obvio que hay un error porque se trata del mismo monte)
1862	Catálogo MUP (ICONA, 1991)	No consta monte, ya que ningún terreno forestal de la Clasificación anterior pasó a formar parte del Catálogo, seguramente al encontrarse ya muy degradados.
1901	Catálogo MUP (ICONA, 1993)	No consta monte.
1945	Foto aérea (Figura 24, arriba)	No se ven árboles en el espacio de la restauración Se ve la zona del monte Jara como un encinar poco denso
1956	Foto aérea	No se ven árboles en el espacio de la restauración Se ve la zona del monte Jara como un encinar poco denso
1964-1971	Proyectos de restauración (Tabla 3.18)	Topónimo "Las Cárcabas" (sic) Fotos en las que se ven las cárcavas y los terrenos deforestados
1970	Foto aérea	Se aprecia con detalle dónde se hizo la repoblación, la preparación del suelo. Esto nos permite saber qué terrenos se repoblaron y cuáles no, y dónde fue un fracaso la repoblación
2002	Foto aérea (Figura 24, abajo)	Se ve la masa forestal actual
2012	Catálogo MUP actual	No consta monte



Debido a que Bonilla formaba parte del territorio periférico del alfoz de Ávila y, por tanto era difícil de controlar desde allí, fue convertida en señorío a principios del siglo XIII, siendo su primer señor el obispo abulense Domingo Blasco. Posteriormente Bonilla se convierte en el núcleo principal del patrimonio del obispado al que se van anexionando territorios. La tierra se usaba según círculos concéntricos en torno a las poblaciones: cerca del pueblo se localizaba la zona más fértil con huertos, linares, prados, etc.; a continuación los trigales y viñas; y por último, la parte más alejada, formada en este caso por espesos montes de encina y roble, se usaba como pastizales, para extraer leña o para sembrados aislados. Está demostrada la presencia de pinos en la zona mediante el análisis de polen (Génova *et al.*, 2009), y existen algunas referencias toponímicas medievales que así parecen atestiguarlo: en la venta de una moheda (lugar con vegetación espesa, llena de árboles y maleza) al concejo de Bonilla de la Sierra en 1295, se habla de un lugar denominado Navalpinareda (Del Ser, 1998; Génova *et al.*; 2009); y en el libro de la Montería (siglo XIV) se menciona el topónimo Pinareio en el Valle del Corneja (Génova *et al.*; 2009).

A principios del siglo XIV, a consecuencia de una crisis alimentaria, el señor de Bonilla cedió tierras a quienes estuvieran dispuestos a cultivarlas, naciendo como consecuencia pequeñas poblaciones en las navas de montaña y en las zonas libres del llano. Es posible que en aquel momento nacieran las aldeas de Tórtoles, Pajarejos y Cabezas, a modo de arrabales de Bonilla, como avanzadilla en la colonización y roturación de las zonas serranas más próximas a “los rebollares”, de los que queda vestigio en algunos topónimos actuales como El Rebollar o Dehesa de Rebollar del Puerto. Probablemente en este momento comenzaran a generalizarse los procesos erosivos, ya que existe constancia de que en la cercana sierra de Villanueva, al este de la zona de estudio, el suelo estaba muy erosionado debido a las roturaciones realizadas que fomentaban la escorrentía en las laderas (Barranco, 1993).

También en el siglo XIV se constituye la Comunidad de Villa y Tierra de Bonilla, que comprendía esta villa y las aldeas de sus alrededores. Su objetivo era la explotación racional de los recursos y la participación en los gastos de forma compartida, aunque muchos atribuyen su formación al deseo de las oligarquías locales de aprovecharse de pastos infrautilizados (Barranco, 1997). Con la Comunidad se crea una nueva estructura de explotación del suelo que implica la ruptura de espacios naturales, la conquista del monte, la especialización en determinados cultivos, la unificación del terrazgo en cuanto, por ejemplo, a la siembra, los pagos, etc., la cesión de derechos, como la derrota de mieses, y la creación de espacios comunitarios de la aldea (tres dehesas, ejidos, moheda, etc.) y de la Comunidad (como “los rebollares”, donde todos los concejos tenían su parte para pasto). También se delimitan los baldíos, o terrenos comunitarios de la Villa y Tierra, donde podían pastar todos los animales de la Comunidad (como La Jara, que podría coincidir con el topónimo actual de Hoya de la Jara), y las laderas (zonas de mayor pendiente de la Comunidad). A diferencia de otras villas y aldeas, la comunidad de Bonilla poseía una economía basada tanto en la agricultura (centeno, cebada, trigo y garbanzos) como en la ganadería (la mayor parte del ganado era ovino, aunque también el vacuno, caprino y porcino). Los aprovechamientos en el monte no se limitan a la corta de leña o madera, sino también



a la entrada de ganado, como se plasma en un documento de 1335 en que Alfonso XI ordena al concejo de Piedrahíta que autorice a los vasallos del obispo de Ávila a meter el ganado y sacar madera y leña de las sierras y ejidos de Bonilla: *“Et que agora nuevamente que les non queredes consentir que pasçan en las sierras e exidos de Piedrafita segunt que husaron siempre a pasçer e cortar lenna e madera en la manera que dicha es”* (Del Ser, 1998; Génova et al.; 2009).

A principios del siglo XVI en un documento de quejas y peticiones que se presenta al señor de Bonilla, queda patente que el obispo admitía más ganado en el término que lo que mandaban las ordenanzas, y que obligaba a labrar la moheda (Barranco, 1997). Los intentos por roturar las laderas enfrentó a agricultores y ganaderos, que se negaban a perder superficie pastable. En las nuevas ordenanzas del siglo XVI destaca la gran preocupación sobre la conservación de los montes (Barranco, 1997). Así, en la ley XII se puede leer: *“...Por quanto estando como está esta villa e su tierra asentada e situada en tierra tras de sierra estéril, e no tiene otros propios sino los montes que tiene, e se crían e criarán, aviendo buena guarda e racaudo en ellos, e estos montes faltando, no se podían sussentar los vecinos, e porque fasta aquí no avía tan buena guarda e orden como a la guarda dellos convenía, para que antes se aumentasen e que no se destruyesen ny disminuyesen, lo qual todo es muy notorio, e sin ellos no se diesen e pusiesse de una buena orden, para que dichos montes de qui adelante se quiten y eviten los tales daños o los males que quitar y arredrar se les pueda, en especial en la Moheda...”*. Las ordenanzas recogen importantes penas para quien infrinja las leyes de montes, se prohíbe cortar encinas y robles en algunas zonas, así como sus copas y también tomillos, se restringen derechos ancestrales de oficiales públicos para reforzar la protección del monte, se regula la forma en que los pastores pueden hacer lumbre, se controla el consumo de leña y bellotas, se prohíbe coger “cáscara” de encinas y robles, se prohíbe ramonear y varear encinas, entre otras restricciones. Sin embargo, esta normativa no fue eficaz, y la roturación de los terrenos forestales fue continua: debido a la recuperación económica y demográfica, se produjo el desarrollo de los arrabales de Tórtoles y Cabezas equiparándolos a otras aldeas, gracias a su proximidad a los rebollares, donde se encontraban los mejores pastos comunitarios, que favoreció su desarrollo ganadero (Barranco, 1997).

Junto a un declive demográfico, una crisis financiera en la Iglesia abulense hace que, con consentimiento papal, el señorío eclesiástico de Bonilla se desmembrara, perdiendo las villas no integradas en la Comunidad de Villa y Tierra (Barranco, 1997). El Catastro del Marqués de Ensenada (hacia 1750) habla de un monte alto de encina propio de la Comunidad y de una dehesa de pastos (Tabla 3.17). La proporción entre terreno cultivado e inculto en el territorio de la comunidad rondaba el 50%. Se tiene noticia de que las encinas de la villa se vieron afectadas por un ataque de oruga en los años 1772 y 1773, produciendo enormes pérdidas en la recogida de bellota; para acabar con la plaga se sacó en procesión por el monte al Santísimo Cristo de la Misericordia, cosechándose al año siguiente una cantidad de bellota valorada en 200.000 reales (Barranco, 1997). Aproximadamente un siglo después, cuando la población de la Comunidad alcanza su máximo histórico, Madoz (1850) menciona montes de encina en Tórtoles, Pajarejos y Cabezas, además de una chopera en esta



última localidad (Tabla 3.17). Aunque normalmente los montes incluidos en la Clasificación de 1859 como exceptuados de desamortización, por no ser desamortizados ni vendidos, se incluían en el posterior Catálogo de Montes de Utilidad Pública, los que aparecen registrados en Tórtoles y Bonilla (Tabla 3.17) no siguieron ese camino y quedaron bajo la pertenencia de los ayuntamientos sin ningún tipo de protección. Las fotografías aéreas de la zona muestran de forma fehaciente la evolución de la vegetación durante el siglo XX (Tabla 3.17 y Figura 3.24): la imagen de 1945 revela la ausencia total de vegetación arbórea, mientras que en la del 2002 son continuas las manchas de pinares densos procedentes de la restauración que a continuación se describirá.

3.1.6.3. Trabajos de restauración de la cuenca del río Corneja

Como consecuencia de todos los factores históricos explicados, entre los que destacan el sobrepastoreo y el abusivo aprovechamiento de leñas y madera del monte, la vegetación arbórea se fue degradando. Así se describe en uno de los proyectos de restauración que se emprendieron (Azcarretazábal, 1964): *“El pastoreo abusivo primero (sin tener en cuenta las primitivas talas que descuajaron el monte de roble del que todavía quedan vestigios dispersos por toda la zona) las roturaciones efectuadas en grandes altitudes en terrenos de fuertes pendientes, han degradado sumamente los terrenos en los que se presentan fuertes erosiones y multitud de ellas en iniciación, con escasa vegetación muy maltrecha ésta en todo caso”*. Así, a mediados del siglo XX la cuenca del río Corneja estaba casi deforestada por completo, apareciendo graves procesos de erosión, razón por la que la Confederación Hidrográfica del Duero se plantea la restauración. Para que la ejecución fuera más sencilla, se decidió dividir el proyecto en varias partes, en concreto se redactó un proyecto para cada localidad: Tórtoles, Cabezas de Bonilla, Pajarejos, Casas del Puerto de Villatoro y Bonilla de la Sierra (Figura 3.25). Además un proyecto final se encargaba de la repoblación con frondosas en las partes más bajas de otros términos municipales, llegando hasta el propio río Corneja. En la Tabla 3.18 se recogen los diferentes proyectos con una síntesis de las actuaciones planteadas. El autor de los proyectos fue el ingeniero de montes David Azcarretazábal Mantecón, que describía la zona de esta manera (Azcarretazábal, 1964): *“Está la zona que nos ocupa despoblada de vegetación arbórea existiendo solamente matorral y erosiones frecuentes que proporcionan gran cantidad de arrastres que a través del río Corneja van al río Tormes, aguas arriba del embalse de Santa Teresa en la provincia de Salamanca”* (Mongil et al., 2013).



Figura 3.24. Evolución de la cubierta forestal (Mongil *et al.*, 2013). Arriba: Fotografía aérea de 1945, del Ejército del Aire. Abajo: Fotografía aérea de 2002, del Instituto Geográfico Nacional.

Tabla 3.18. Relación de proyectos de restauración (Mongil *et al.*, 2013)

TÍTULO	AÑO	DESCRIPCIÓN
Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja. Tramo I. TM de Tórtoles	1964	Proyectados 313 diques y repoblación de 428 ha con <i>Ppt</i> y <i>Psl</i>
Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja (Embalse de Santa Teresa). Tramo II. TM de Cabezas de Bonilla (Ávila).	1964	Proyectados 421 diques y repoblación de 980 ha con <i>Ppt</i> , <i>Php</i> , <i>Psl</i>
Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja (Embalse de Santa Teresa). Tramo III. TM de Pajarejos (Ávila).	1965	32 diques y repoblación de 588 ha de repoblación con <i>Ppt</i> , <i>Php</i> , <i>Psl</i>
Proyecto de repoblación forestal en la cuenca del río Corneja. Tramo IV. TM de Bonilla de la Sierra (Ávila). Embalse de Santa Teresa.	1965	Repoblación en 920 ha con <i>Php</i> , <i>Ppt</i>
Proyecto de repoblación forestal -cuenca del río Corneja-. Tramo V. TM de Casas del Puerto de Villatoro (Ávila). Embalse de Santa Teresa	1971	Repoblación en 959 ha con <i>Php</i> , <i>Ppt</i> , <i>Psl</i>
Proyecto de repoblación forestal en la cuenca del río Corneja. Tramo VI-Frondosa-. TM de Piedrahíta y otros (Ávila). Embalse de Santa Teresa	1970	Repoblación de 179 ha con <i>Pxe</i> , clones 5 y negro, y aliso

Ppt: *Pinus pinaster*; *Php*: *Pinus halepensis*; *Psl*: *Pinus sylvestris*; *Pxe*: *Populus x euramericana*

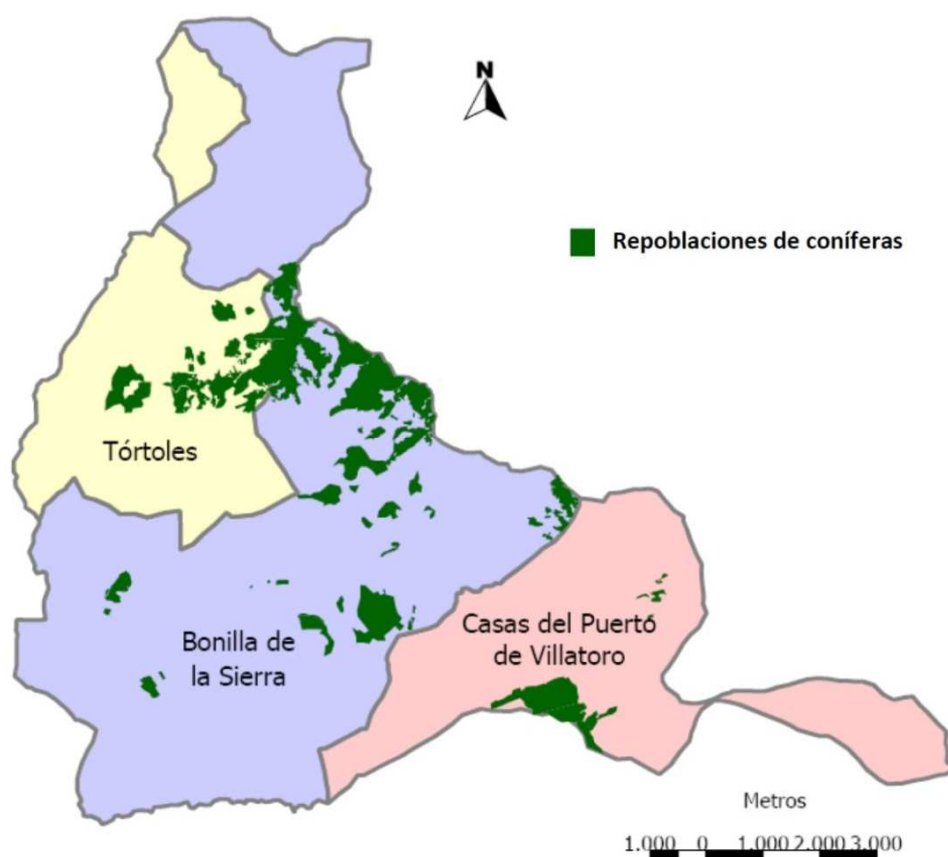


Figura 3.25. Localización de las repoblaciones de coníferas presentes actualmente en los términos de Tórtoles y Bonilla de la Sierra (que engloba las localidades de Cabezas de Bonilla y Pajarejos). Es probable que la restauración hidrológico-forestal llevada a cabo en los años 60 coincida en su mayoría con las actuales repoblaciones de coníferas localizadas en dichos territorios.

3.1.6.4. Restauración hidrológico-forestal de Tórtoles

La superficie objeto de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles era propiedad del Ayuntamiento, tenía carácter comunal, y se consorció para efectuar la repoblación, de forma que cedió los terrenos a la Confederación Hidrográfica del Duero para que llevase a cabo el proyecto, siendo la inversión un adelanto a cuenta de los futuros ingresos por aprovechamientos forestales. En la Figura 3.26 se puede observar el aspecto que presentaban las laderas y barrancos de Tórtoles, previo a la restauración hidrológico-forestal, y en la Tabla 3.19 las características de esta restauración.

El monte tenía una servidumbre de pastos desde tiempos ancestrales, muy posiblemente de origen medieval. Esta circunstancia se resolvió dejando sin repoblar terrenos suficientes para que pudiera pastar el ganado, si bien para efectuar la repoblación se acotó el terreno al pastoreo, que precisamente era una de las causas principales de la degradación del bosque.



Figura 3.26. Panorámica de la zona de estudio. Situación previa al proyecto de restauración hidrológico-forestal (Azcarretazábal, 1964)

3.1.6.5. Vegetación actual

Las especies señaladas en la repoblación proyectada no se corresponden con las que finalmente se emplearon (Tabla 3.20). La repoblación efectuada en 1964 es actualmente un pinar adulto de *Pinus pinaster*, *P. sylvestris*, *P. nigra* y *P. halepensis*. El primero de ellos aparece disperso por todo el monte, con un mayor porte y apariencia más vieja, mientras que las restantes especies aparecen agrupadas y en filas de repoblación. Destaca la introducción del pino carrasco, propio del levante peninsular y fuera de sus estaciones naturales. Entre las coníferas también se encuentra en la zona de estudio el ciprés de Arizona (*Cupressus arizonica*) (Figura 3.27). Todas las especies



de coníferas han sido fruto de la repoblación, si bien parece que el pino resinero es el que mejor se ha adaptado.

Tabla 3.19. Principales características de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Mongil *et al.*, 2013)

Superficie de actuación	428,41 ha
Altitud	1.100-1.500 m
Régimen legal	Propiedad del Ayuntamiento, carácter comunal, consorcio con la Confederación Hidrográfica del Duero
Especies antes de la restauración	<i>Populus nigra</i> (E), <i>Quercus ilex ssp. ballota</i> (ME), <i>Quercus pyrenaica</i> (ME), <i>Populus tremula</i> (ME), <i>Salix caprea</i> (ME), <i>Crataegus monogyna</i> (ME), <i>Rosa canina</i> (ME), <i>Sambucus nigra</i> (ME)
Elección de especies	<i>Pinus pinaster</i> (especie principal), <i>Pinus sylvestris</i> (zonas altas) y mezcla de ambas en zonas intermedias. Aunque no aparecen en el proyecto, también se utilizaron <i>P. halepensis</i> , <i>P. nigra</i> y <i>Cupressus arizonica</i>
Preparación del suelo	Fajas alternas de 1 m de anchura y 2 m de separación con contrapendiente. En ellas, con una separación de 1,5 m, se abren casillas de 0,30 x 0,30 x 0,30 m, densidad de 3.333 hoyos/ha
Cuidados complementarios y posteriores	Acotamiento total al pastoreo. Escardas en las casillas para eliminar la vegetación. Reposición de marras. Senda de 1 m de anchura para facilitar el acceso al monte
Diques	Se proyectaron 313 diques de gaviones, de 7 modelos diferentes, en los 11 barrancos principales, de los que se construyeron 123 E= Escasa; ME= Muy escasa

En general, la espesura lograda con la repoblación implica la existencia de sotobosques muy pobres en especies, donde progresivamente se va produciendo regeneración natural de la encina (*Quercus ilex ssp. ballota*) bajo la cubierta de los pinos.

Las especies vegetales que aparecen en los barrancos y cárcavas compiten directamente con las pináceas allí establecidas. La mejora local de las condiciones edáficas, como una mayor humedad, mejor textura, y en algunos casos menor insolación por el sombreado de los propios pinos, permiten el establecimiento de diversas especies más exigentes que éstos, como *Populus nigra*, *Salix fragilis*, *Salix atrocinerea*, *Salix caprea*, y diversas especies pertenecientes a la familia de las rosáceas, como *Crataegus monogyna*, *Rosa canina* o *Rubus* spp. No obstante, la introducción de *Populus nigra* se realizó en 1970, a partir del proyecto de repoblación que afectaba, entre otros municipios, a Tórtoles, como se ha indicado anteriormente.

La construcción de los diques de gaviones ha supuesto no sólo una mejora desde el punto de vista hidrológico (acción que se ve favorecida con la repoblación), sino también en cuanto al establecimiento de especies en terrenos donde encontraban dificultades, debido a las altas pendientes y la insolación (Figura 3.28). En zonas donde



se localizan estas estructuras, y en exposiciones particularmente favorables, podemos encontrar cerezos (*Prunus avium*). Su origen es natural, ya que la zona del Valle del río Corneja es región de procedencia de semillas de cerezo silvestre, pero también es una especie objeto de cultivo. En los prados y huertas cercanas es posible encontrar dicha especie, sobre todo cercano a las lindes (Figura 3.29).

Tabla 3.20. Vegetación antes y después de la restauración

Tipo de vegetación	Antes de la restauración (después de los proyectos de restauración 1964, 1965)		Actualidad	
Árboles y arbustos	<i>Populus nigra</i>	Escasa	<i>Pinus pinaster</i>	Abundante
	<i>Quercus ilex ssp. ballota</i>	Muy escasa	<i>Pinus sylvestris</i>	Abundante
	<i>Quercus pyrenaica</i>	Muy escasa	<i>Pinus halepensis</i>	Frecuente
	<i>Populus tremula</i>	Muy escasa	<i>Pinus nigra</i>	Frecuente
	<i>Salix caprea</i>	Muy escasa	<i>Crataegus monogyna</i>	Frecuente
	<i>Crataegus monogyna</i>	Muy escasa	<i>Rosa canina</i>	Frecuente
	<i>Rosa canina</i>	Muy escasa	<i>Cupressus arizonica</i>	Escasa
	<i>Sambucus nigra</i>	Muy escasa	<i>Sambucus nigra</i>	Escasa
			<i>Populus nigra</i>	En el fondo de barrancos
			<i>Populus x euramericana</i>	En el fondo de barrancos
			<i>Populus tremula</i>	En el fondo de barrancos
			<i>Salix caprea</i>	En el fondo de barrancos
			<i>Salix atrocinerea</i>	En el fondo de barrancos
			<i>Salix fragilis</i>	En el fondo de barrancos
		<i>Ulmus minor</i>	En el fondo de barrancos	
	<i>Thymus zygis</i>	Abundante	<i>Thymus zygis</i>	Frecuentes pero sólo en las zonas sin arbolado
Matorral	<i>Cistus albidus</i>	Abundante	<i>Cistus albidus</i>	
	<i>Lavandula stoechas</i>	Abundante	<i>Lavandula stoechas</i>	
	<i>Retama sphaerocarpa</i>	Abundante	<i>Retama sphaerocarpa</i>	



Figura 3.27. Panorámica de una parte de la zona de estudio. Se observan pies de *Cupressus arizonica*, de un color más grisáceo, dispersos por todo el monte, entre los diversos pies de pinos que conforman la repoblación. También se observan *Prunus avium*, de un color rojizo, y *Populus nigra* alrededor de una zona de prado, donde el suelo presenta mejores condiciones para el establecimiento de estas especies.



Figura 3.28. Especies más exigentes se encuentran al lado de los diques de las cárcavas, lugar ideal para su asentamiento

En la parte alta de la zona del proyecto, donde existen claros, se encuentra la especie *Stipa gigantea*. En suelos más evolucionados, el berceo convive con jaras (*Cistus laurifolius* y *Cistus monspeliensis*) y torvisco (*Daphne gnidium*). Estas dos últimas comunidades vegetales son indicadores de que la estación es especialmente favorable al establecimiento de la encina.

Por último hay que señalar que el día 28 de agosto de 2010 se declaró un incendio forestal en la parte alta del pinar (Figura 3.30), que calcinó 11 ha. El 14% de la superficie afectada se correspondía con especies de pinos y el 86% restante con jaras, tomillos y otras. La extrema continuidad horizontal y vertical de combustible debido a la vegetación, especialmente como consecuencia de que, salvo algunas podas en los bordes de los caminos principales, no se han realizado tratamientos selvícolas de mejora hasta 2014, año en que empezaron a hacerse clareos y claras en algunos rodales.



Figura 3.29. Cerezo junto a los muros de una huerta, con chopos y sauces



Figura 3.30. Panorámica de la zona incendiada el 28 de agosto de 2010

3.2. LOS DIQUES DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE TÓRTOLES

Los diques empleados en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles están constituidos por gaviones que se colocan uno encima de otro, de forma similar a las presas de ladrillos, hasta conseguir la estructura deseada. Además, se les dispone de un filtro en contacto con el terreno para evitar su hundimiento y la pérdida del sustrato. En el proyecto de restauración hidrológico-forestal de Tórtoles se diseñaron 7 modelos distintos de diques, con 3 alturas distintas: 2,5 m, 3 m, y 3,5 m. En la Figura 3.31 se pueden observar el alzado, la planta y la sección de los modelos de dique 1 a 7.

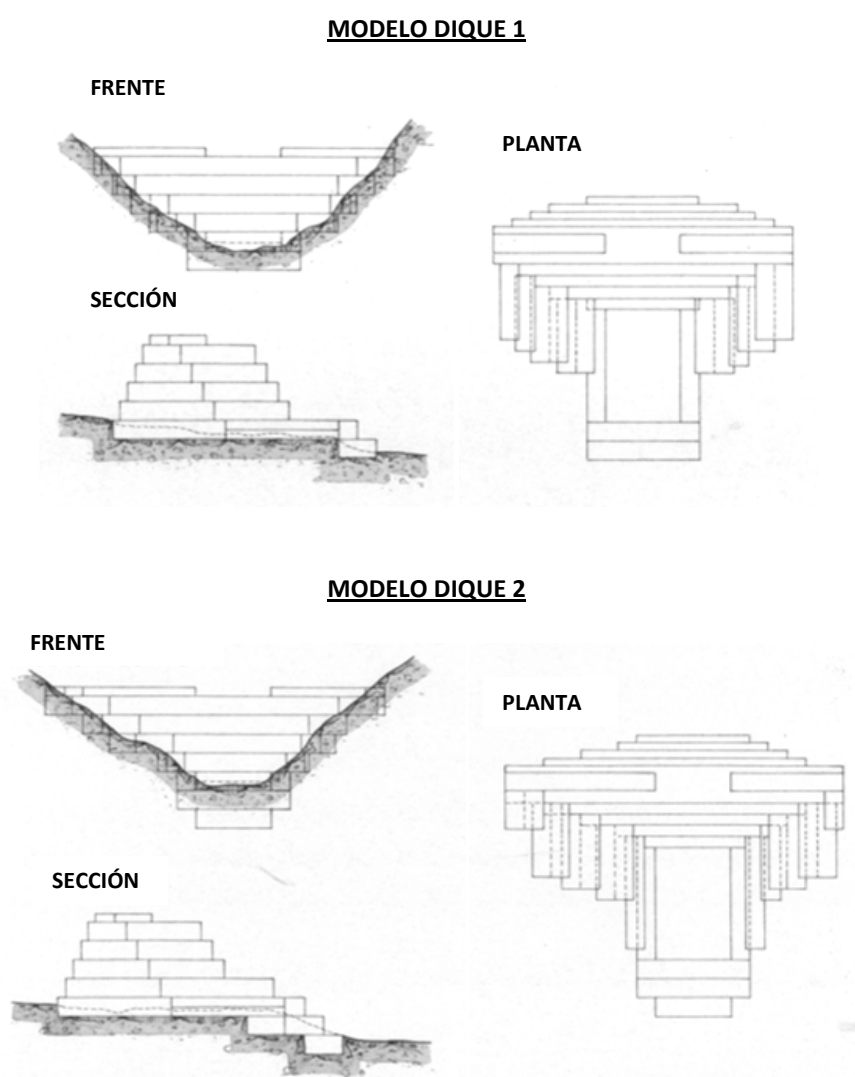
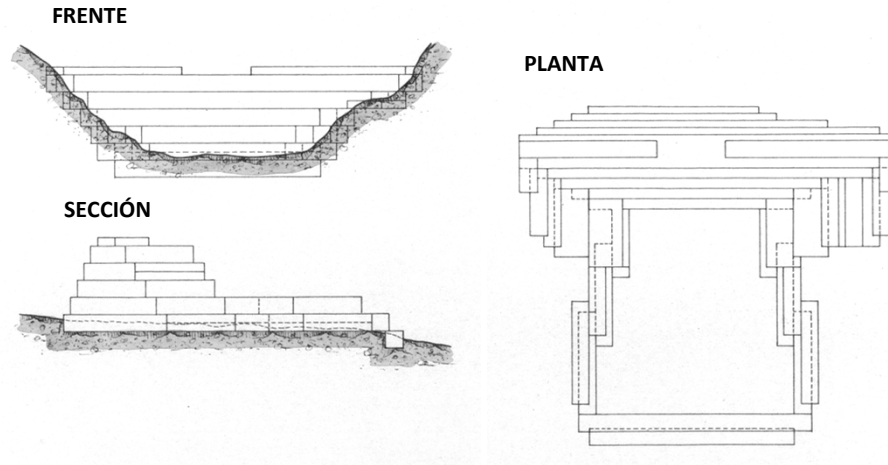
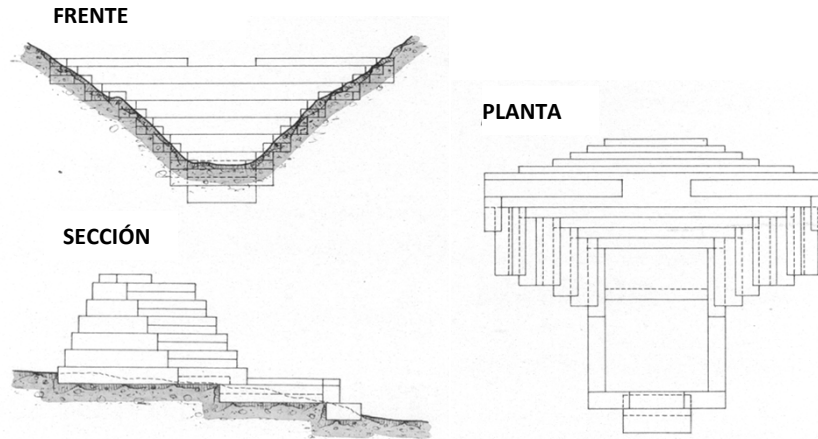


Figura 3.31. Modelos de diques 1 a 7 del proyecto de restauración de Tórtoles (Azcarretazábal, 1964) (parte 1/3)

MODELO DIQUE 3



MODELO DIQUE 4



MODELO DIQUE 5

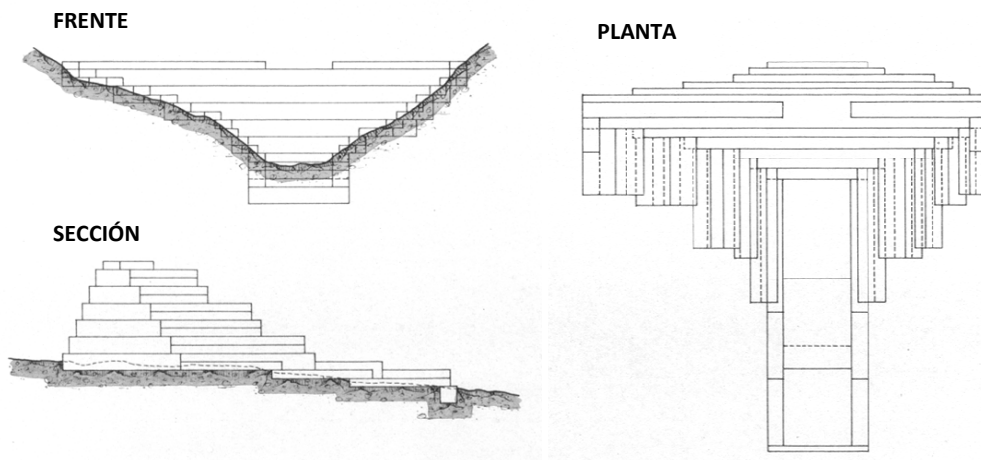


Figura 3.31. Modelos de diques 1 a 7 del proyecto de restauración de Tórtoles (Azcarretazábal, 1964) (parte 2/3)

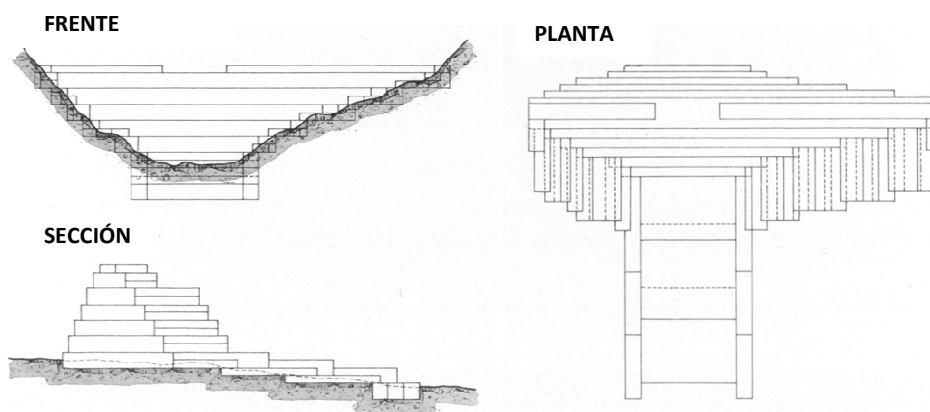
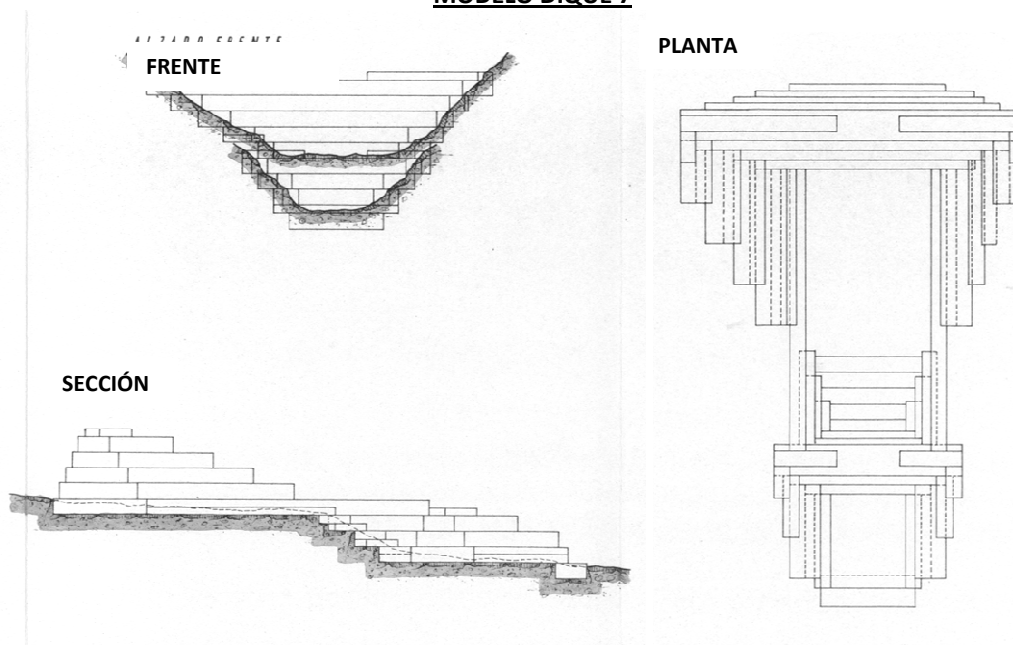
MODELO DIQUE 6**MODELO DIQUE 7**

Figura 3.31. Modelos de diques 1 a 7 del proyecto de restauración de Tórtoles (Azcarretazábal, 1964)
(parte 3/3)

En total se proyectaron 7 tipos de gaviones, todos ellos con una altura de 0,5 metros, por lo que se trata de gaviones de base, de acuerdo con la clasificación de Martín-Vide (2002). Las dimensiones de cada uno de estos tipos se muestran en la Tabla 3.21.

En el proyecto se decidió la construcción de un total de 323 diques en el término municipal de Tórtoles. Gracias al proyecto de investigación “Inventariación de diques forestales y evaluación de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila)”, financiado por el convenio Universidad Católica de Ávila-Caja de Ávila, en el que también se incluye la presente tesis doctoral, se ha llevado a cabo un inventario de los diques de la restauración estudiada³. El resultado es que finalmente se construyeron

³ Los trabajos de campo fueron realizados por Luis Ignacio Resina Gutiérrez y Álvaro Díaz Sánchez bajo la dirección del profesor Jorge Mongil Manso.

123 diques en la zona. La metodología del inventario se basa en la diseñada por Martínez de Azagra *et al.* (2002), para inventariar los diques de la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). Tanto la metodología como los resultados obtenidos para cada uno de los diques se presentan en el Anexo I. En la Figura 3.32 se puede observar la ubicación de los diques inventariados.

Tabla 3.21. Dimensiones de los tipos de gaviones proyectados en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Azcarretazábal, 1964)

	Longitud (m)	Altura (m)	Ancho(m)
Gavión tipo 1	1	0,5	0,25
Gavión tipo 2	2	0,5	0,25
Gavión tipo 3	3	0,5	0,25
Gavión tipo 4	2	0,5	0,5
Gavión tipo 5	3	0,5	0,5
Gavión tipo 6	4	0,5	0,5
Gavión tipo 7	5	0,5	0,5



Figura 3.32. Ubicación de los diques inventariados



3.3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA CUÑA DE SEDIMENTOS

Para alcanzar el objetivo principal de esta tesis es necesario desarrollar una metodología detallada para la estimación del volumen de la cuña de sedimentos que han sido retenidos en los diques de corrección hidrológica. Existen otras metodologías propuestas por otros autores (McManus & Duck, 1985; Van den Wall Blake, 1986; Neil & Mazari, 1993; Foster & Walling 1994; White *et al.*, 1996; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Boix-Fayos *et al.*, 2008; Sougnez *et al.*, 2011; Bellin *et al.*, 2011; Bussi *et al.*, 2013), pero se trata de estimaciones muy simplistas, que apenas emplean datos de campo, por lo que se consideran poco ajustadas a la realidad. Por lo tanto, se plantea a continuación una metodología de detalle que permita determinar con un mayor grado de certeza la efectividad de los diques forestales en la retención de sedimentos.

Por otra parte, en cuanto a los instrumentos utilizados, por lo general se emplean dispositivos GPS aparatos de medición cada vez más utilizados en topografía, y que pueden ser empleados con buenos resultados para realizar levantamientos topográficos de cuencas hidrográficas; sin embargo, la medición de la cuña de sedimentos debe ser exacta, de forma que un error del orden de metros, como el que ofrecen las versiones menos precisas de estos instrumentos, producen graves errores en el resultado final de la medición de la cuña de sedimentación que no pueden ser asumidos en un estudio de estas características. De hecho, no es adecuado el uso de GPS para trabajos profesionales de precisión, ya que la localización del punto obtenido puede variar dentro de un diámetro de 100 m Amado (1997). Además, en lugares con cubierta vegetal o bosques espesos no es posible la recepción de las señales emitidas por los satélites Amado (1997). En la actualidad, existen GPS submétricos, con una precisión centimétrica, que ofrecen resultados similares a los obtenidos mediante el uso de la estación total. Sin embargo, dado que no presentan dificultades al emplearse bajo cubierta arbolada ya que se pierde la señal de los satélites, para este trabajo se ha decidido utilizar la estación total, un instrumento de medición de gran precisión (centimétrica) para elementos en los que se requiere una medición de detalle, como es el caso de estudio.

3.3.1. MEDICIONES PREVIAS: LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Consiste en realizar un levantamiento topográfico mediante estación total, un instrumento topográfico óptico-electrónico que permite medir la posición de un punto en tres dimensiones, referidas a la ubicación del instrumento. Con este instrumento se obtienen las coordenadas Y (cotas), respecto de las coordenadas X (longitudes o distancias). Esta característica se ha empleado para determinar la cuña de sedimentos a través de dos pasos:

- 1º Estimando el lecho original sobre el que se asienta la actual cuña de sedimentos.
- 2º Determinando, mediante secciones transversales, la superficie actual de la cuña.

Para poder hacer estas determinaciones que posteriormente se explican, se precisa el siguiente material:

- Estación total Nikon DTM-332, trípode, prisma reflector y mira extensible de 2,15 metros, en cuyo extremo se encaja el prisma
- Cintas métricas
- Picas o jalones
- Vadeador, en caso de existencia de agua en el cauce

Una vez realizada la puesta en estación del instrumento se comienzan las mediciones.

3.3.1.1. Mediciones para la determinación del lecho original

Se toma una primera medición para delimitar el extremo final de la cuña de sedimentos (Figura 3.33). Esta cuestión puede resultar compleja, y precisa una observación detallada de los sedimentos, y en concreto de la diferencia de tamaño o granulometría del material sedimentado. Este extremo puede ser sólo un punto, pero también puede terminar con una determinada anchura, por lo que hay que ajustar estas mediciones a la forma observada, y tomar los puntos necesarios, con un metro de separación entre ellos, hasta abarcar la longitud total del extremo final (Figura 3.34).

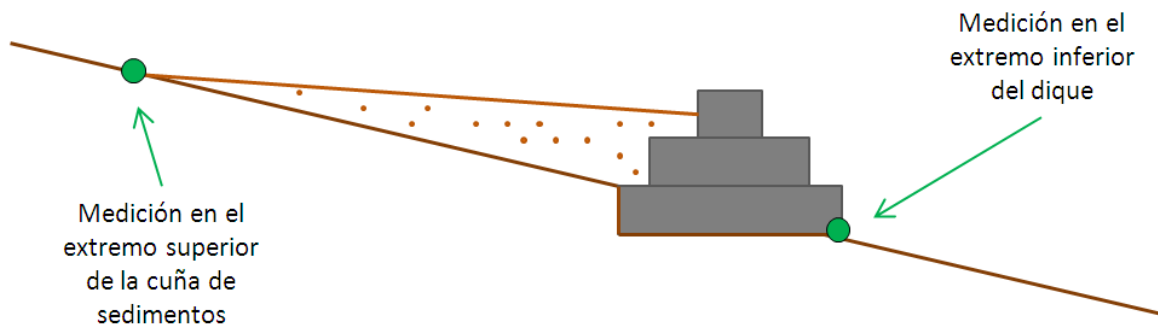


Figura 3.33. Mediciones a realizar con la estación total, representadas en el perfil longitudinal de la cárcava

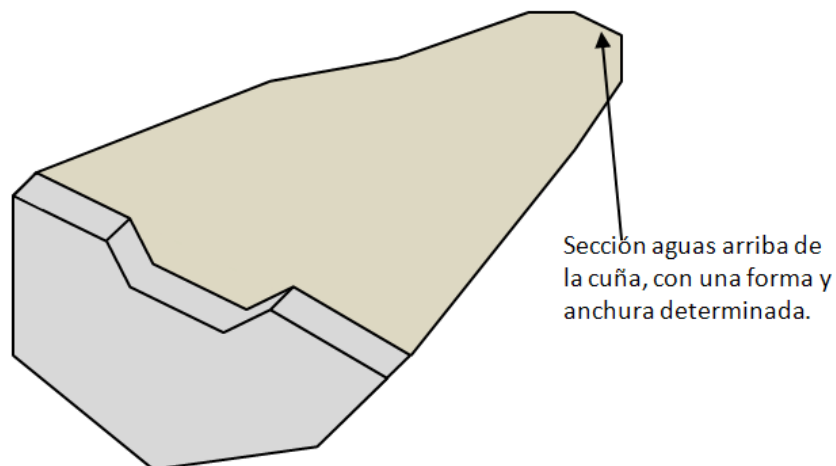


Figura 3.34. Representación gráfica de una cuña de sedimentos que no termina en una sección recta

La segunda medición consiste en realizar una sección transversal inmediatamente aguas abajo del dique, en contacto con la última fila de gaviones, o con el dissipador, en su caso. Para ello, en primer lugar se coloca la cinta métrica sujeta con jalones a ambos extremos del cauce, y tomando como guía esta cinta se va colocando la mira con el prisma sucesivamente a cada metro, para tomar la sección trasversal deseada con ayuda de la estación total. En la Figura 3.35 se muestra, en alzado, los puntos que se van tomando, marcados con espas verdes. Además, se medirá la distancia horizontal o reducida, entre esta sección y el extremo final de la cuña, con ayuda de la cinta métrica y plomada. En la práctica sólo será necesario medir la distancia entre la sección aguas abajo del dique y la sección aguas arriba del dique, que coincide con el comienzo de la cuña de sedimentos.

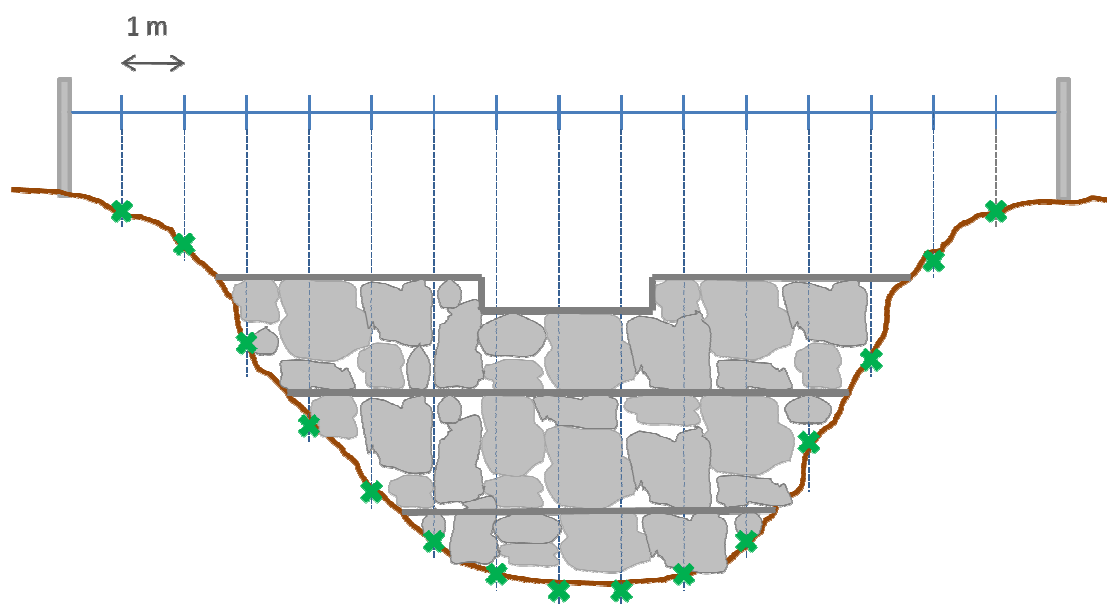


Figura 3.35. Alzado de las mediciones a realizar con la estación total, en el corte transversal inmediatamente aguas abajo del dique

La unión de cada uno de estos puntos con el punto anterior, representado gráficamente en la Figura 3.36, permite obtener una estimación de gran exactitud del lecho del cauce sobre el que se produjo la deposición de sedimentos tras la construcción del dique.

Por último, hay que mencionar un caso que es posible encontrar: cuñas con dos o más colas. En estos casos habrá que tomar el extremo final de cada una de las colas que posea la cuña. El tratamiento de este caso particular se irá explicando sucesivamente en cada apartado.

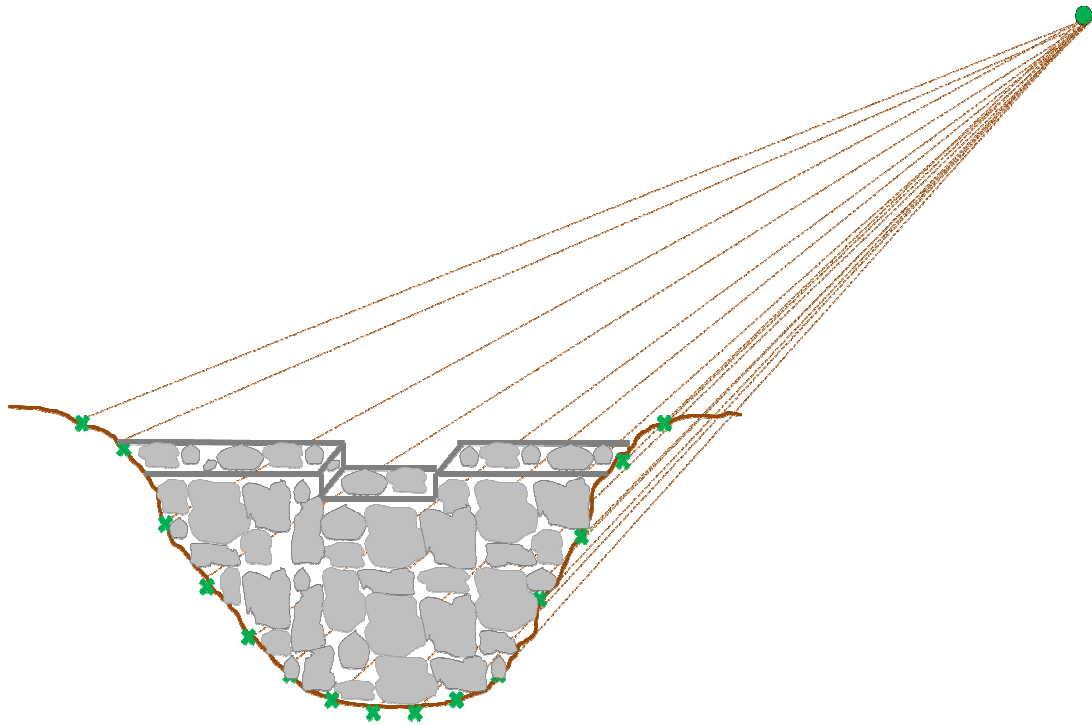


Figura 3.36. Resultado gráfico de la unión de las mediciones realizadas, obteniendo el lecho donde se asienta la cuña de sedimentos

3.3.1.2. Mediciones para determinar la cuña de sedimentos actual

Se basa en realizar un levantamiento topográfico de la cuña de sedimentos a través de sus secciones transversales, obteniendo los puntos que delimitan su superficie actual. El número de secciones o perfiles transversales levantados con la estación depende de la longitud que posea la cuña de sedimentos, de forma que se ha determinado que entre dos secciones transversales consecutivas se debe dejar una distancia que variará de 1 a 5 metros, en función de la longitud de la cuña de sedimentos, tal y como se observa en la Tabla 3.22. De esta forma, si la cuña, por ejemplo, tiene una dimensión longitudinal de 19,2 metros, se levantará un perfil cada 3 metros, es decir, a los 0 metros (en contacto con el dique), a los 3 metros, y así sucesivamente hasta los 18 metros, y una sección más adicional, en el extremo de la cuña, a los 19,2 metros, resultando un total de 8 perfiles transversales.

Tabla 3.22. Distancia entre dos secciones transversales consecutivas según la longitud de la cuña

Longitud de la cuña (m)	Distancia entre secciones (m)
$x \leq 5$	1
$5 < x \leq 10$	2
$10 < x \leq 21$	3
$21 < x \leq 32$	4
$x > 32$	5

En el cálculo de tierras a mover entre dos secciones transversales consecutivas, para la construcción de vías forestales, se emplea una distancia de 40 m en terrenos llanos y 20 m en terrenos de montaña (Casanova, 2002). Este dato muestra la diferencia de magnitudes entre las metodologías habitualmente empleadas y la propuesta, y da una idea de la exhaustividad y exactitud del método que se expone.

Dentro de cada perfil, se toma una medición cada metro, con la ayuda de una cinta métrica, de forma análoga al apartado anterior, de forma que la longitud de cada sección transversal dependerá del ancho de la cuña. En la zona de estudio, las longitudes de las secciones transversales se ajustan adecuadamente a esta separación entre cada medición a realizar. Adicionalmente, en cada una de esas secciones, se toma un punto cada 1 m y a cada extremo lateral de la cuña para incluir las laderas a la sección transversal de la cárcava o cauce, según el caso (Figura 3.37).



Figura 3.37. Disposición de la estación total y de la cinta métrica para comenzar a levantar topográficamente un perfil de la cuña de sedimentos

Se comienza seleccionando la primera sección transversal aguas abajo, en el punto en el que comenzaron a depositarse los sedimentos, que coincide con la sección aguas arriba del dique, en contacto con él, y se continúa avanzando aguas arriba. La última sección se corresponde con al extremo de la cuña de sedimentos tomado en el apartado anterior. Además, se anota la distancia entre las dos últimas secciones transversales, ya que no tiene porqué coincidir con 1 m (Figuras 3.38 y 3.39).

En el caso de que nos encontremos con una cuña con dos o más colas, se realizarán las mismas mediciones en cada una de las colas: Superficie de la cuña en cada cola y mediciones a ambos lados para determinar la pendiente de las laderas.

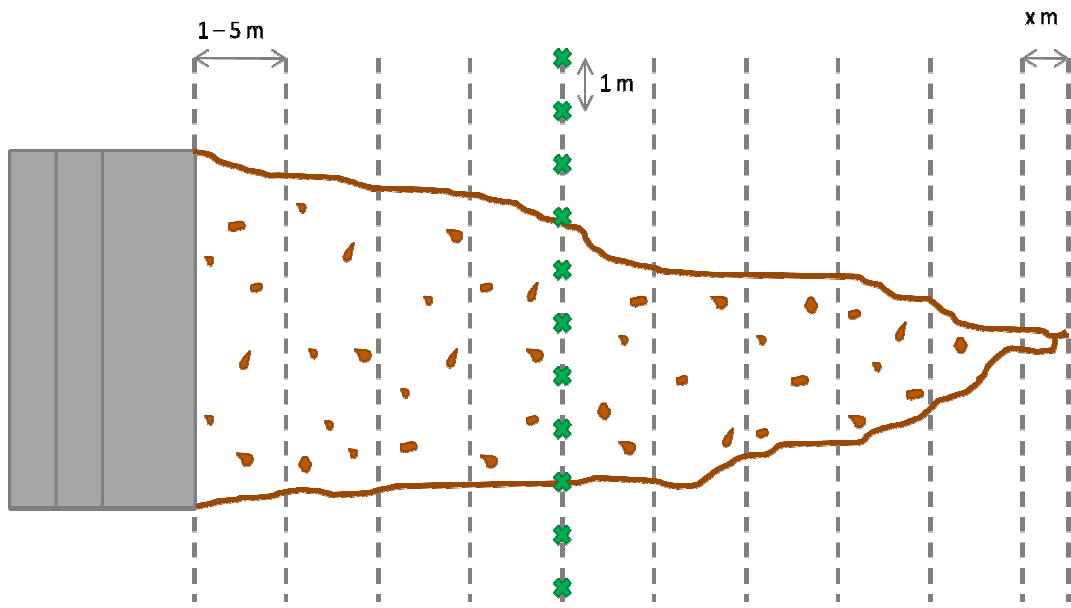


Figura 3.38. Vista en planta de las mediciones de las secciones transversales a la cuña de sedimentos

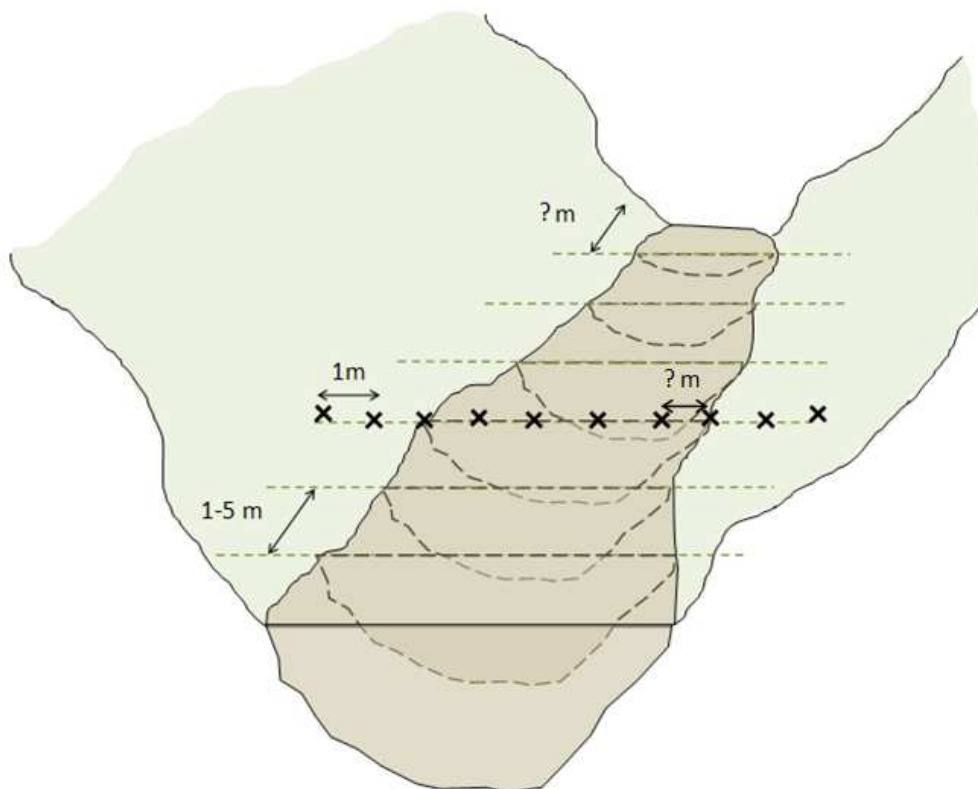


Figura 3.39. Vista en tres dimensiones de las mediciones a realizar para determinar la superficie actual de la cuña de sedimentos

3.3.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN

Una vez realizadas todas las mediciones, los pasos necesarios para determinar el volumen de la cuña de sedimentos, expresado en m^3 , son los siguientes:

1. Determinar el área de cada sección transversal de la cuña.
2. Determinar el volumen de la cuña entre cada par de secciones.
3. Determinar el volumen total de la cuña de sedimentos.

3.3.2.1. Área de cada sección transversal de la cuña

El levantamiento topográfico permite obtener, por secciones transversales, el lecho sobre el que se asienta la cuña de sedimentos, y la superficie de ésta. Por tanto, unificando en cada sección los datos anteriores tendremos los datos necesarios para determinar el área de cada sección transversal de la cuña de sedimentos.

Para ello se debe realizar una serie de cálculos. En primer lugar se toma el punto central de la sección aguas abajo del dique (el de menor cota) como el punto de referencia (0,0), ya que se trabaja con coordenadas relativas. Esta sección completa se traslada hasta corresponder con la primera sección de la superficie de la cuña de sedimentos. Es decir, las cotas de esta sección se consideran coincidentes con las cotas del asiento de la cuña aguas arriba del dique, ya que se estima que su construcción se realizó nivelada en el asiento que se pretende estimar. Una vez trasladadas las cotas, se une la sección de referencia (0,0) con el extremo de la cuña de forma lineal, obteniendo el resultado de la cota a las distancias marcadas por el resto las secciones tomadas de la superficie de la cuña de sedimentos (Figura 3.40).

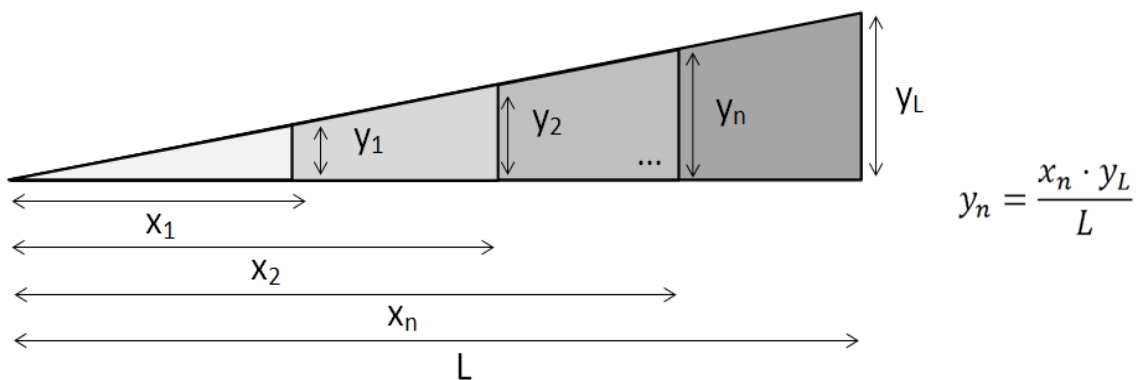


Figura 3.40. Cálculo de cotas para la estimación del asiento de la cuña de sedimentos

A continuación, se realiza la extrapolación, de forma lineal, igualmente, pero en el sentido lateral, es decir, en coincidencia con cada sección transversal de la cuña de sedimentos, de acuerdo con las cotas restantes de la sección aguas abajo, y considerando una ascensión de éstas al extremo de la cuña de forma oblicua. Para ello, como cada línea oblicua que une con el extremo de la cuña va a tener mayor longitud según se aleje de la línea central, primero se determina la longitud de cada una de

estas diagonales, y a continuación se determina la cota que le corresponderá a cada línea oblicua en cada sección transversal.

En caso de que el extremo final no sea un solo punto si no varios, se unirá cada diagonal con cada cota del extremo siguiendo su localización en el espacio, de forma que el punto situado a cada metro del extremo final se unirá con cada punto de la sección aguas arriba del dique situado a cada metro de la cota de referencia.

Y si la cuña posee varias colas, se tratará cada una de estas colas como cuñas independientes, y se determinarán de forma idéntica las cotas del lecho sobre el que se asientan. Y en cuanto al resto de la cuña (hasta el punto en el que la cuña se bifurque en dos colas o más), se estimarán las cotas de su asiento tomando como extremo final los extremos de las cuñas, a las distancias a las que se encuentren (Figura 3.41) como si se tratase de un extremo de la cuña que no coincide con un punto si no con una determinada anchura.

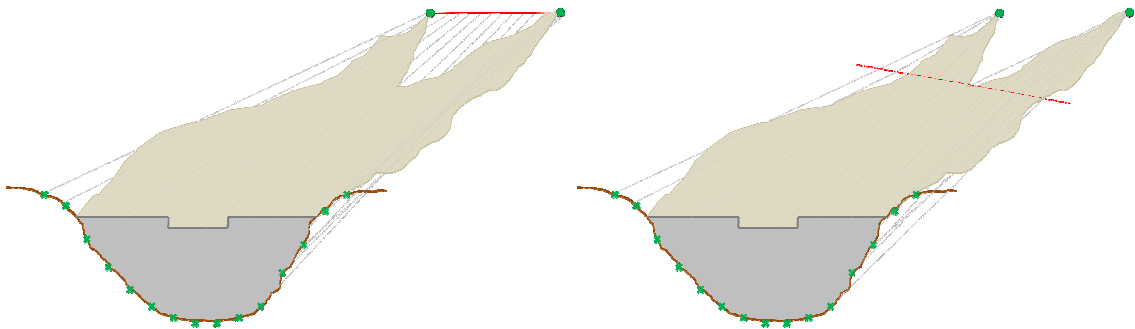


Figura 3.41. Estimación del lecho sobre el que se asienta la cuña de sedimentos en aquellos casos en que la cuña se bifurque en dos colas

Obtenidas las cotas del asiento original para cada sección transversal, y con las cotas de la superficie obtenidas directamente con la estación total, obtendremos polígonos cerrados en el que las coordenadas inferiores corresponden al asiento y las superiores a la superficie de la cuña actual.

Estas coordenadas se representan gráficamente con el software AUTOCAD 2010. Una vez introducidas todas las coordenadas del asiento y de la superficie actual de la cuña, se observa que los puntos de inicio y fin de la cuña a cada lado de la sección no tienen porqué coincidir con el lecho estimado. Es decir, en ocasiones, esta unión de coordenadas no dará un polígono cerrado para cada sección y será necesario hacer un ajuste para conseguirlo. Para realizar este ajuste, se ha considerado como criterio más adecuado el prolongar la pendiente que tengan las laderas (puntos tomados a ambos lados de cada sección transversal), de forma que alargando estas pendientes se consigue un polígono cerrado. Sin embargo, se considera que la profundidad de la cuña de sedimentos en cada sección transversal es un dato que debemos conservar, de forma que si al utilizar la pendiente de las laderas se pierde la profundidad, ya sea minorándola o aumentándola (es decir, si esta prolongación no corta con las coordenadas del lecho estimado) es más adecuado realizar la unión de acuerdo con la

pendiente que sigue el asiento original de la cuña (cauce estimado). Si aún así no se produce esa confluencia, se realiza la unión lineal, pero ante todo se toma como criterio que la pendiente empleada permita que la cuña conserve la profundidad estimada, considerando este dato correcto ya que en términos medios, la cuña sigue la pendiente estimada (Figura 3.42).

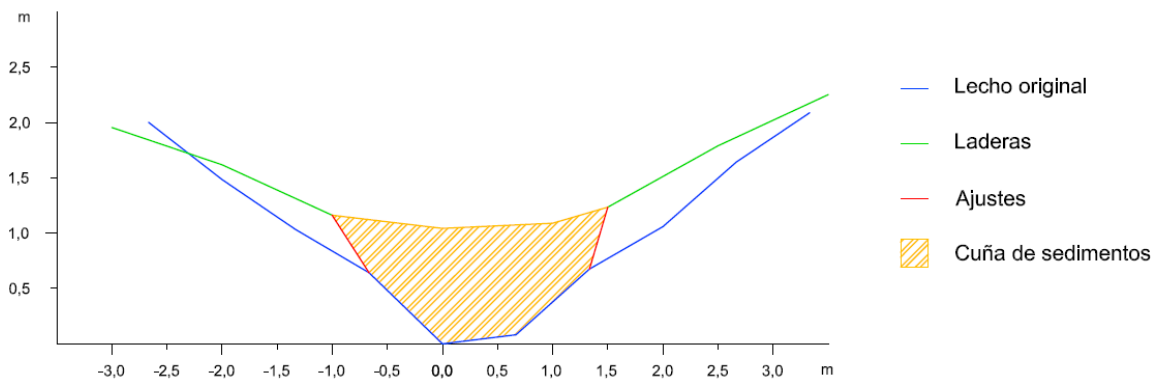


Figura 3.42. Ejemplo de ajustes a realizar para cerrar el polígono que conforma la cuña de sedimentos en una sección transversal

Una vez conseguidas las coordenadas tras el ajuste, se podrá determinar el área de cada polígono que representa cada sección transversal de la cuña estimada.

Esta área puede obtener de varias formas (Herráez & Díaz, 2011):

- Gráficamente:
 - o Dibujando el perfil transversal sobre papel milimetrado y contando las unidades de superficie constante establecidas previamente cuyo centro quede dentro de los límites del perfil. Posteriormente, el número de unidades obtenido se multiplicará por la superficie real que según la escala empleada le corresponde al cuadro utilizado como referencia para el conteo.
 - o Descomponiendo el área del perfil transversal en figuras geométricas de área conocida (trapezios y triángulos) para medir directamente en el dibujo las dimensiones necesarias para el cálculo de sus áreas.
 - o Mediante la utilización de un planímetro (sobre el perímetro del perfil previamente dibujado): En este caso no existe mayor complicación que la de conocer y dominar el manejo del aparato para repetir varias veces la operación.
 - o Cálculo electrónico: A través de la utilización de modelos digitales del terreno (M.D.T.), o de software de diseño gráfico, como AUTOCAD.
- Analíticamente: Se trata de uno de los métodos de cálculo de la superficie de los perfiles transversales más exacto.

En esta metodología se aplica el cálculo analítico, combinado con el empleo del software AUTOCAD, que se utiliza para representar con detalle las secciones

estudiadas, y obtener una estimación del corte transversal de la cuña en cada sección transversal.

Para aplicar la metodología de cálculo analítico se parte de las coordenadas de los vértices de la sección transversal $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)]$, considerando a ésta como una figura plana y desarrollando la matriz oportuna, tal y como se expone a continuación:

$$S = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n-1} & y_n & y_1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{n-1} & x_n & x_1 \end{vmatrix}$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot [(y_1 \cdot x_2 + y_2 \cdot x_3 + \dots + y_{n-1} \cdot x_n + y_n \cdot x_1) - (y_2 \cdot x_1 + y_3 \cdot x_2 + \dots + y_n \cdot x_{n-1} + y_1 \cdot x_n)]$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot [(y_1 \cdot (x_2 - x_n) + y_2 \cdot (x_3 - x_1) + \dots + y_n \cdot (x_1 - x_{n-1}))]$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot \sum y_n \cdot (x_{n+1} - x_{n-1})$$

Donde las coordenadas de los vértices de la sección o perfil transversal deben estar referidas al punto más bajo que se toma como origen de coordenadas, de forma que en cada perfil se determinan las coordenadas relativas correspondientes para realizar el cálculo (Figura 3.43).

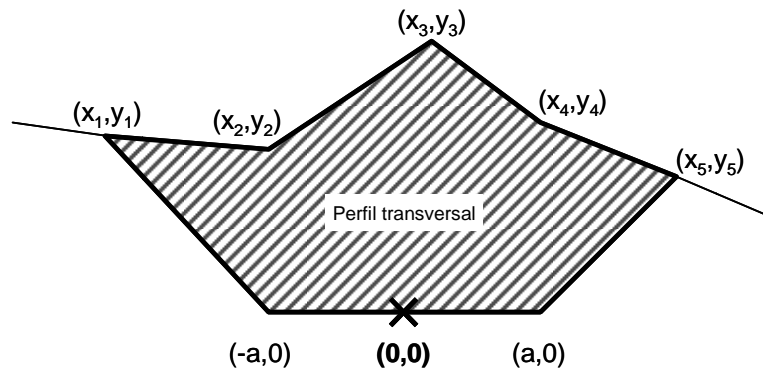


Figura 3.43. Coordenadas relativas del perfil transversal para determinar su área por cálculo matricial (Herráez & Díaz, 2011)

La superficie del perfil transversal se determina aplicando la siguiente matriz:

$$S = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 0 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & 0 & 0 \\ -a & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & a & -a \end{vmatrix}$$

3.3.2.2. Volumen de la cuña entre dos perfiles consecutivos

Para realizar el cálculo del volumen de cuña existente entre dos perfiles transversales consecutivos, se debe seguir el siguiente protocolo:

- a. Conocer las áreas cada sección transversal de la cuña.
- b. Conocer la distancia entre las dos secciones transversales.
- c. Calcular el volumen parcial de cuña entre ambas secciones.

Determinadas las áreas de las diferentes secciones transversales de la cuña, el volumen de cuña entre las mismas se calcula, por parejas de secciones y por tanto de manera parcial para el conjunto de la cuña, de acuerdo con la metodología que se expone a continuación.

Para la realización de estos cálculos, independientemente de la fórmula empleada, se hace preciso asimilar el sólido comprendido entre ambos perfiles transversales consecutivos a un prismoide (Figura 3.44), del cual se conoce la fórmula matemática del valor de su volumen. De acuerdo con Herráez & Díaz (2011) un prismoide es cualquier sólido limitado por dos caras planas, paralelas y de cualquier forma (secciones transversales), denominadas bases, y por una superficie reglada (talud – plataforma – talud – terreno), engendrada por una recta que se apoya en ambas caras (secciones transversales), siendo el área de una sección cualquiera paralela a las bases una función algebraica, racional y entera de primer, segundo o tercer grado de la distancia de la sección a una de las bases.

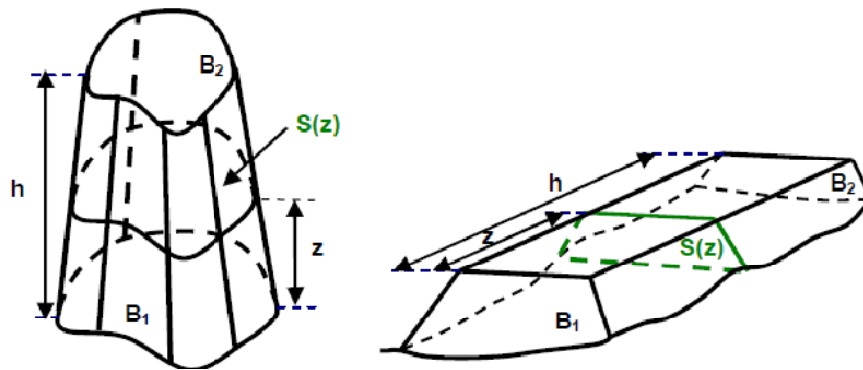


Figura 3.44. Cálculo de volúmenes entre perfiles mediante la fórmula del prismoide (Herráez & Díaz, 2011)

La fórmula del prismoide es la siguiente:

$$V_p = \frac{h}{6} \cdot (B_1 + B_2 + 4 \cdot B_m)$$

Donde V_p representa el volumen obtenido aplicando la fórmula del prismoide, B_1 y B_2 son el área de la sección 1 y de la sección 2, respectivamente (bases del prismoide), B_m es el área de la base media del prismoide, y h la distancia entre las bases del prismoide. Sin embargo, para aplicar esta fórmula, se precisa de una sección intermedia, de la cual se conoce su área. Por tanto, con los datos obtenidos con la estación total, se podrá aplicar esta fórmula para determinar el volumen comprendido entre los perfiles 1 y 3, los perfiles 2 y 4, y así sucesivamente hasta llegar al penúltimo perfil, ya que el último no se sitúa a una distancia equidistante.

La hipótesis de asimilar el sólido comprendido entre dos secciones transversales a un prismoide, no es total y absolutamente exacta, ya que aunque las propias secciones transversales pueden ser las bases del prismoide, el terreno no es nunca una superficie



reglada. No obstante, si las secciones han sido establecidas a una distancia tal que la diferencia de cotas entre ellas no es excesiva, el volumen así obtenido tiene suficiente exactitud. Además, se debe tener en cuenta que este error en unos casos es por exceso y en otros por defecto, por lo que en el contexto global estos errores se compensan en gran medida (Herráez & Díaz, 2011).

Para determinar el volumen entre dos secciones consecutivas, se puede emplear la fórmula de la media de las secciones extremas, de forma que si las generatrices del prismoide son paralelas a un plano director, se verifica que:

$$B_m = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

Por lo que sustituyendo el valor de esa base media en la anterior ecuación del prismoide se obtiene la siguiente ecuación, en la que V_{MSE} representa el volumen obtenido con la fórmula de la media de las secciones extremas:

$$V_{MSE} = \frac{h}{6} \cdot \left(B_1 + B_2 + 4 \cdot \frac{(B_1 + B_2)}{2} \right)$$
$$V_{MSE} = \frac{h}{6} \cdot (3B_1 + 3B_2)$$
$$V_{MSE} = \frac{(B_1 + B_2)}{2} \cdot h$$

Donde B_1 y B_2 son el área de las secciones 1 y 2, respectivamente, (bases del prismoide), y h la distancia entre las bases del prismoide.

El método de las secciones extremas es un método fácil de entender y aplicar, pero sin embargo ofrece resultados poco exactos ya que considera que el área transversal varía linealmente con la longitud. Por ello, un análisis comparativo indica que el cálculo del volumen aplicando la fórmula del prismoide ofrece una mayor exactitud (Casanova, 2002).

Por último, el volumen de tierras entre dos perfiles transversales consecutivos, siempre que éstos sean homólogos, también se puede calcular asimilando el sólido engendrado a un prisma de base la sección media, aplicando la fórmula siguiente, en la que V_{SM} representa el volumen obtenido con la fórmula de la sección media:

$$V_{SM} = B_m \cdot h$$

Esta fórmula únicamente se puede emplear entre perfiles alternos, utilizando como sección media la del perfil que se encuentra entre esos dos perfiles.

Cuando se requiere una mayor exactitud en el cálculo del volumen se recomienda utilizar la fórmula del prismoide (Casanova, 2002). Al utilizar las otras dos ecuaciones



planteadas (media de las secciones extremas y sección media) en lugar de la del prismoide, se comete un error, que se determina mediante la diferencia entre los valores obtenidos por las fórmulas de la media de las secciones extremas y de la sección media con el valor obtenido por la fórmula del prismoide:

$$A_1 = V_{MSE} - V_p$$

$$A_1 = \left(\frac{B_1 + B_2}{2} \cdot h \right) - \left(\frac{h}{6} \cdot (B_1 + B_2 + 4B_m) \right)$$

$$A_1 = \frac{h}{6} \cdot (2B_1 + 2B_2 - 4B_m)$$

$$A_1 = \frac{h}{3} \cdot (B_1 + B_2 - 2B_m)$$

Siendo A_1 el error cometido al usar la fórmula de la media de las secciones extremas (V_{MSE}) en lugar de la del prismoide (V_p), podrá ser cometido por exceso, cuando: $B_1 + B_2 > 2 \cdot B_m$ o por defecto, cuando $B_1 + B_2 < 2 \cdot B_m$.

$$A_2 = V_{SM} - V_p$$

$$A_2 = B_m \cdot h - \frac{h}{6} \cdot (B_1 + B_2 + 4B_m)$$

$$A_2 = -\frac{h}{6} \cdot (B_1 + B_2 - 2B_m)$$

Siendo A_2 el error cometido al usar la fórmula de la sección media (V_{SM}) en lugar de la del prismoide (V_p), al ser de signo negativo, podrá ser cometido por exceso, cuando: $B_1 + B_2 < 2 \cdot B_m$ o por defecto, cuando $B_1 + B_2 > 2 \cdot B_m$.

Si comparamos ambos errores resulta que:

$$A_1 = -2 A_2$$

O que:

$$A_2 = -\frac{A_1}{2}$$

Es decir, el error cometido al aplicar la fórmula de la sección media (V_{SM}) es la mitad y de signo contrario al error cometido al utilizar la fórmula de la media de las secciones extremas (V_{MSE}) (Herráez & Díaz, 2011).

3.3.2.3. Volumen total de la cuña de sedimentos

Se determina sumando las cantidades obtenidas en el paso anterior. Para la realización de los cálculos se emplea una tabla (Tabla 3.23), que ayuda a tener los datos organizados para finalmente obtener el volumen total de la cuña de sedimentos.



No obstante, hay que tener en cuenta la morfología del dique, ya que cuando una parte de éste quede aterrada (por ejemplo cuando el paramento aguas arriba es escalonado) se debe restar el volumen del dique que queda aterrado, ya que en caso contrario se estaría cometiendo un error de sobredimensionamiento del volumen final de sedimentos.

Tabla 3.23. Determinación del volumen de la cuña de sedimentos

Secciones transversales	Distancia entre perfiles (m)	Área del perfil transversal (m ²)	Volumen (m ³)
1			
2			
2			
3			
3			
4			
...			
...			
n-2			
n-1			
n-1			
n			
VOLUMEN TOTAL			

3.4. COMPARACIÓN DEL RESULTADO OBTENIDO CON OTRAS METODOLOGÍAS

Se ha realizado una comparación entre el resultado obtenido aplicando el método propuesto, y el resultado que se obtiene aplicando las fórmulas que plantean otros autores, en concreto las fórmulas de Castillo *et al.* (2007) y Romero *et al.* (2007a), ya que son las más empleadas en España y ambos asemejan la cuña de sedimentos a un cuerpo geométrico, asimilable a lo que se realiza en esta tesis, y por lo tanto se consideran metodologías comparables. Además, otros autores como Sougnez *et al.* (2011) los utilizan como base de sus cálculos, por lo que se ha considerado adecuada esta selección de metodologías para la comparación de resultados.

Castillo *et al.* (2007) plantea dos fórmulas en función de la forma aproximada del cauce: forma de U, típica de ramblas, o forma de V, común en los pequeños cauces ubicados en la parte alta de la cuenca. Por lo tanto, para la zona de estudio, la fórmula de Castillo *et al.* (2007) considera que la zona de estudio posee una sección transversal con forma aproximada de V. De esta manera, la anchura media de la cuña de sedimentos (w) se estima como (Figura 3.45):

$$w = \frac{(w_b + w_s)}{2}$$



Donde w_b es el ancho de la base del dique en la sección aguas abajo de éste, y w la anchura media de la cuña de sedimentación, que obtiene a partir de la medición de la superficie de la cuña de sedimentos (S), como S/l_s , siendo l_s la longitud de la cuña de sedimentos medida sobre el terreno.

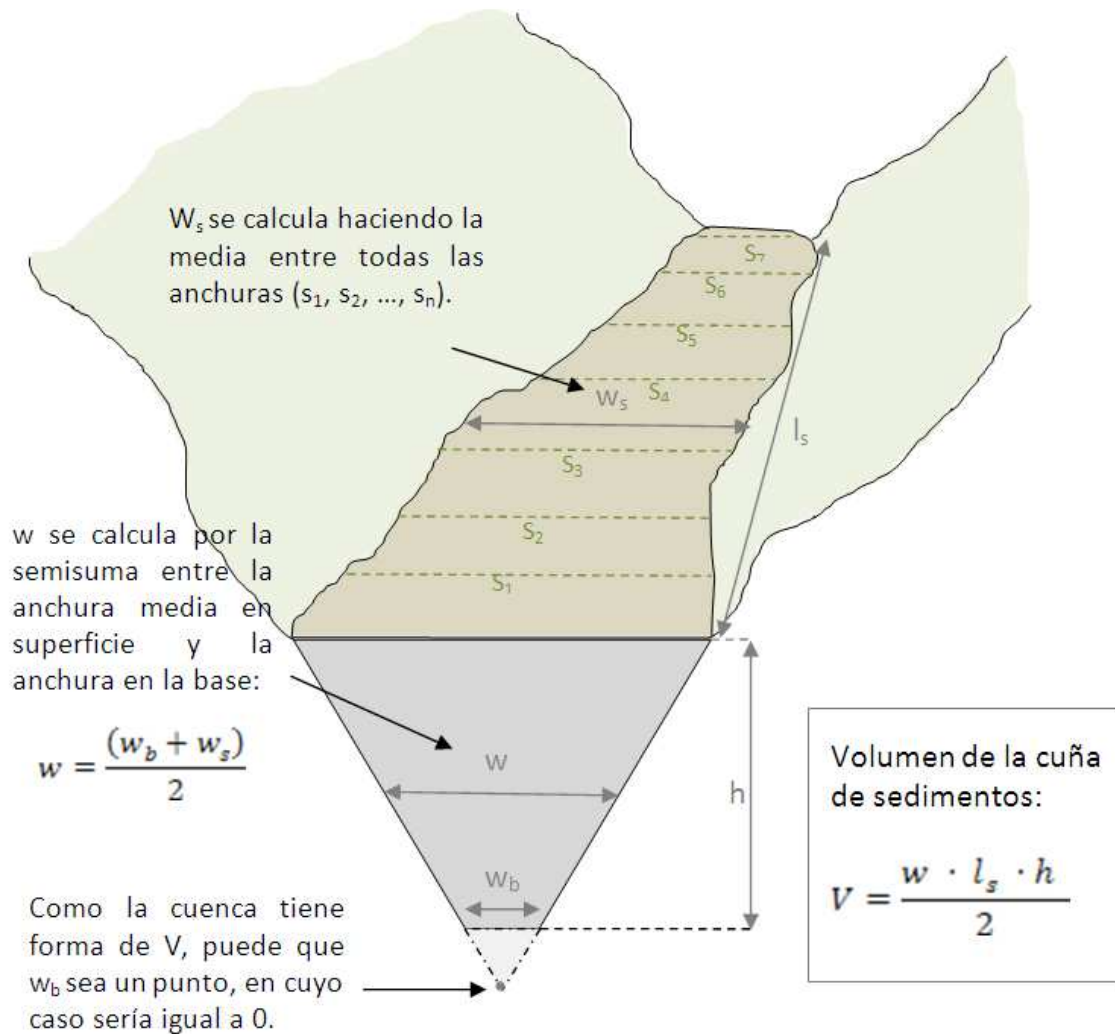


Figura 3.45. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007). S_i =anchura de la cuña en la sección transversal i ; w_s =anchura media de la cuña de sedimentación (calculado como la media de las anchuras de la cuña en la secciones transversales i); w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas abajo de éste; w =anchura media del canal relleno de sedimentos; h =altura de los sedimentos desde la base del dique; l_s =longitud de la cuña de sedimentos.

El volumen de sedimentos almacenados aguas arriba de los diques se estima aplicando la fórmula:

$$V = \frac{(w \cdot l_s \cdot h)}{2}$$

Donde w es la anchura media de la cuña de sedimentos, l_s es la longitud de la cuña de sedimentos medida sobre el terreno, y h es la altura de los sedimentos medidos desde la base del dique.

Romero *et al.* (2007a) asemejan la cuña de sedimentos acumulados en el dique a una pirámide de base trapezoidal en posición horizontal, ya que de acuerdo con Hernández *et al.* (2004) en la mayoría de los casos la cuña se aproxima a esta forma. De este modo, utiliza la siguiente ecuación, correspondiente a la del volumen de la pirámide de base trapezoidal delimitada por la superficie de los sedimentos sobre el dique (Figura 3.46):

$$V = \frac{B \cdot H}{3}$$

Donde V es el volumen de sedimentos, B el área de la base coincidente con el dique, y H la longitud de la cuña de sedimentos, medida sobre el terreno. Además, para aquellas cuñas que posean esta forma, Romero *et al.* (2007a) emplean una combinación de figuras geométricas, si bien no especifica cuáles.

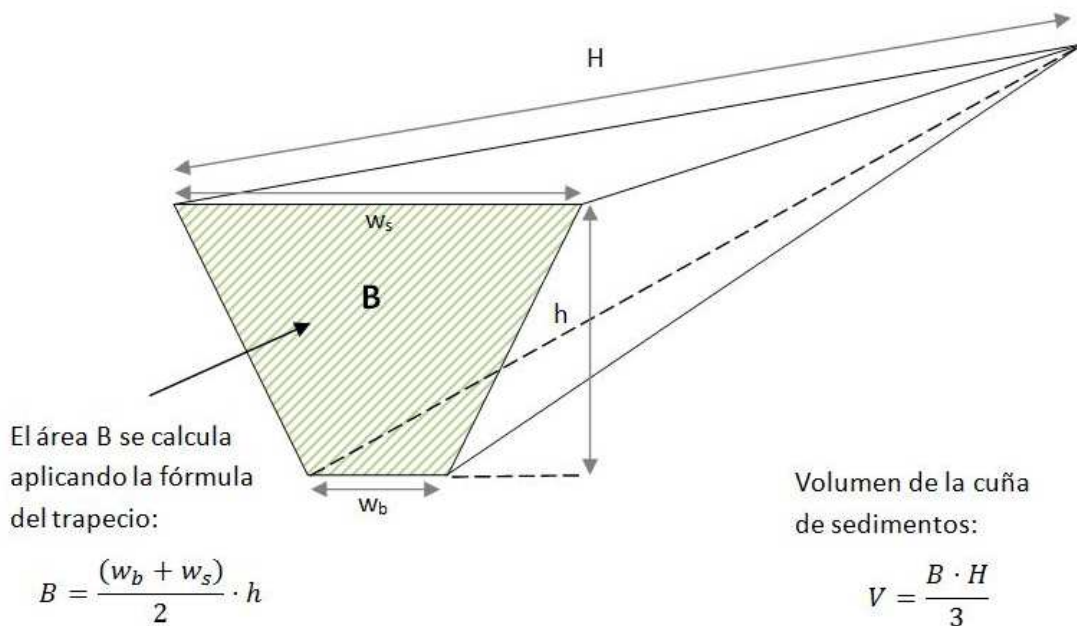


Figura 3.46. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Romero (2008). w_s =ancho de la base del dique en la sección aguas arriba de éste; w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas abajo de éste; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; B =área de la base coincidente con el dique; H =longitud de la cuña de sedimentos.

3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS

3.5.1. DENSIDAD APARENTE

Para conocer la masa total de los sedimentos que han quedado retenidos en el dique, conformando la cuña de sedimentos, es preciso determinar su densidad aparente, que mide la masa por unidad de volumen, siendo este volumen el que ocupa la muestra en el campo, y que se determina siguiendo los pasos del apartado anterior. De acuerdo con Campbell & Hensall (1990), la densidad aparente de un suelo se puede determinar aplicando medidas directas, o utilizando métodos que utilicen distintos tipos de radiaciones (Porta *et al.*, 2003). En este caso se ha aplicado el método del cilindro, el más adecuado a las características del terreno, arenoso y poco pedregoso. Para ello se han utilizado unos cilindros de paredes rígidas y delgadas, cuyas dimensiones pueden observarse en la Figura 3.47, y que recogen una muestra de suelo con un volumen de $96,96 \text{ cm}^3$.

El procedimiento a seguir consiste en clavar los cilindros por su borde biselado en el horizonte o suelo a analizar, y posteriormente extraerlos, obteniendo la muestra de suelo que permanece en su interior. Se debe insertar el cilindro lentamente, con ayuda de la herramienta con mango que se observa en la Figura 3.47, que facilita su introducción en el suelo. Este instrumento posee una marca que indica visualmente cuándo el cilindro ha sido enterrado hasta la superficie natural del suelo. En caso de que no se consiga clavar el cilindro en el suelo, se puede golpear con una maza en el extremo del mango. Es preferible usar lo mínimo posible la maza, ya que al golpear el cilindro se puede producir error por compactación de la muestra. No obstante, en su caso, habría que descontar los huecos no rellenos en el cilindro si son significativos, estimando su volumen, para no sobrevalorar el volumen del cilindro.

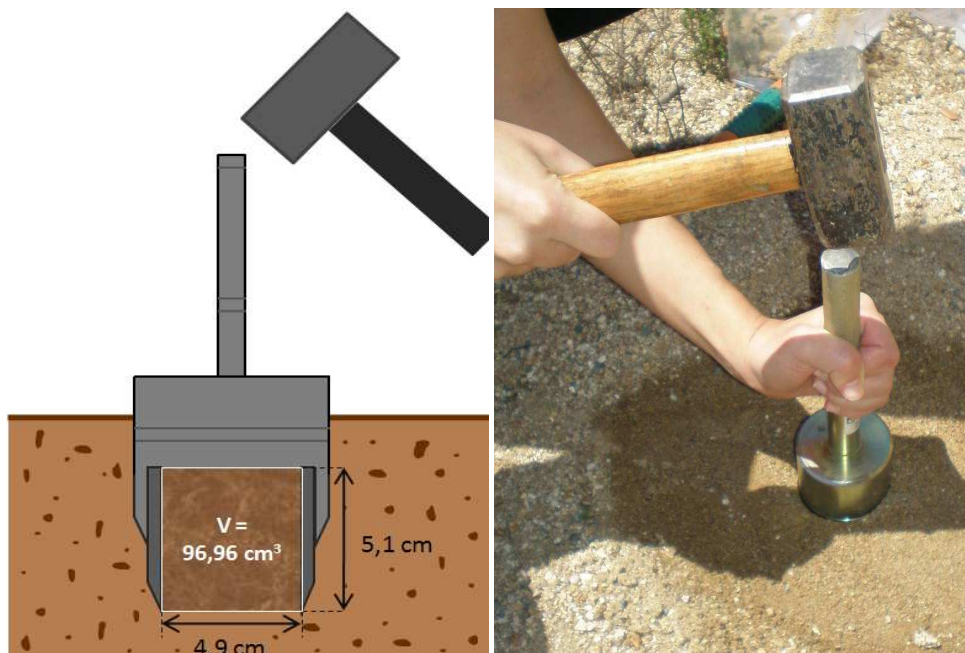


Figura 3.47. Método del cilindro para medir la densidad aparente del suelo



En este trabajo se realizan dos repeticiones, es decir, se toman 2 muestras de sedimento en cada cuña. Una vez tomada la muestra se extrae del cilindro en el laboratorio, y se introduce en la estufa a 105 °C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo se realizan pesadas y se introduce de nuevo en la estufa hasta que la masa sea constante. Conociendo el peso en seco de la muestra y el volumen que ocupa (contenido del cilindro) se obtiene la densidad aparente (D_a , $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) aplicando la fórmula:

$$D_a = \frac{\text{Peso muestra seca (g)}}{\text{Volumen cilindro (cm}^3\text{)}}$$

3.5.2. TEXTURA

La textura de los sedimentos es un parámetro que nos indica la distribución o proporción de las partículas minerales que conforman la muestra extraída de cada cuña de sedimentos, en función de su tamaño. Para su determinación se toma una muestra de la cuña de sedimentos localizada aguas arriba de cada uno de los diques estudiados. Siguiendo la clasificación Soil Taxonomy (USDA, 1985), la Tabla 3.24 muestra los diferentes tamaños de partículas que corresponden a cada denominación. Para determinar la textura, en primer lugar se secan las muestras al aire; a continuación se tamizan, eliminando las partículas de diámetro superior a 2 mm, que constituyen los elementos gruesos, y se pesa cada una de las muestras. Posteriormente se destruye la materia orgánica con peróxido de oxígeno (H_2O_2) al 6%, para individualizar las partículas minerales. Finalmente se dispersa cada muestra con 10 mL de polifosfato de sodio al 30%. De esta forma queda preparada la muestra para determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla presente. Estas fracciones se separan siguiendo el método densimétrico de Bouyoucos, que permite determinar el porcentaje de arena y de limo, y posteriormente, por diferencia respecto de la pesada inicial, se obtiene la cantidad de arcilla que contiene la muestra. Para aplicar este método primero se enrasa la muestra de suelo a 1.000 mL en una probeta con tapón, y se deja estabilizar en cuanto a temperatura durante una hora. A continuación, se prepara, como prueba en blanco, una probeta con hexametáfosfato de sodio y agua, enrasada igualmente a 1.000 mL, y se mide su densidad con el densímetro. Seguidamente se tapan y agitan las probetas con las muestras, y tras la agitación se pone el cronómetro en marcha. Por último, se introduce el densímetro en la probeta a los 3 minutos y a los 90 minutos, anotándose el resultado obtenido. Así, como el densímetro ofrece una densidad que es igual a peso entre volumen, y como se conoce el volumen (1.000 mL), se obtiene como resultado el peso de sustancia que se mantiene en suspensión transcurrido el tiempo señalado (Marañes *et al.*, 1998):

$$\% \text{suspensión} = \frac{\text{Densidad media}}{\text{Peso total muestra}} \cdot 100$$



Finalmente, los datos obtenidos en laboratorio (porcentaje de arena, limo y arcilla) se introducen en el triángulo textural del USDA (Figura 3.48), obteniendo como resultado final la clase textural de las muestras analizadas.

Tabla 3.24. Clasificación de partículas en función del diámetro (SSDS, 1993)

DENOMINACIÓN	DIÁMETROS (μm)
Arena muy gruesa	$2.000 > \phi > 1.000$
Arena gruesa	$1.000 > \phi > 500$
Arena media	$500 > \phi > 250$
Arena fina	$250 > \phi > 100$
Arena muy fina	$100 > \phi > 50$
Limo grueso	$50 > \phi > 20$
Limo fino	$20 > \phi > 2$
Arcilla	$2 > \phi$

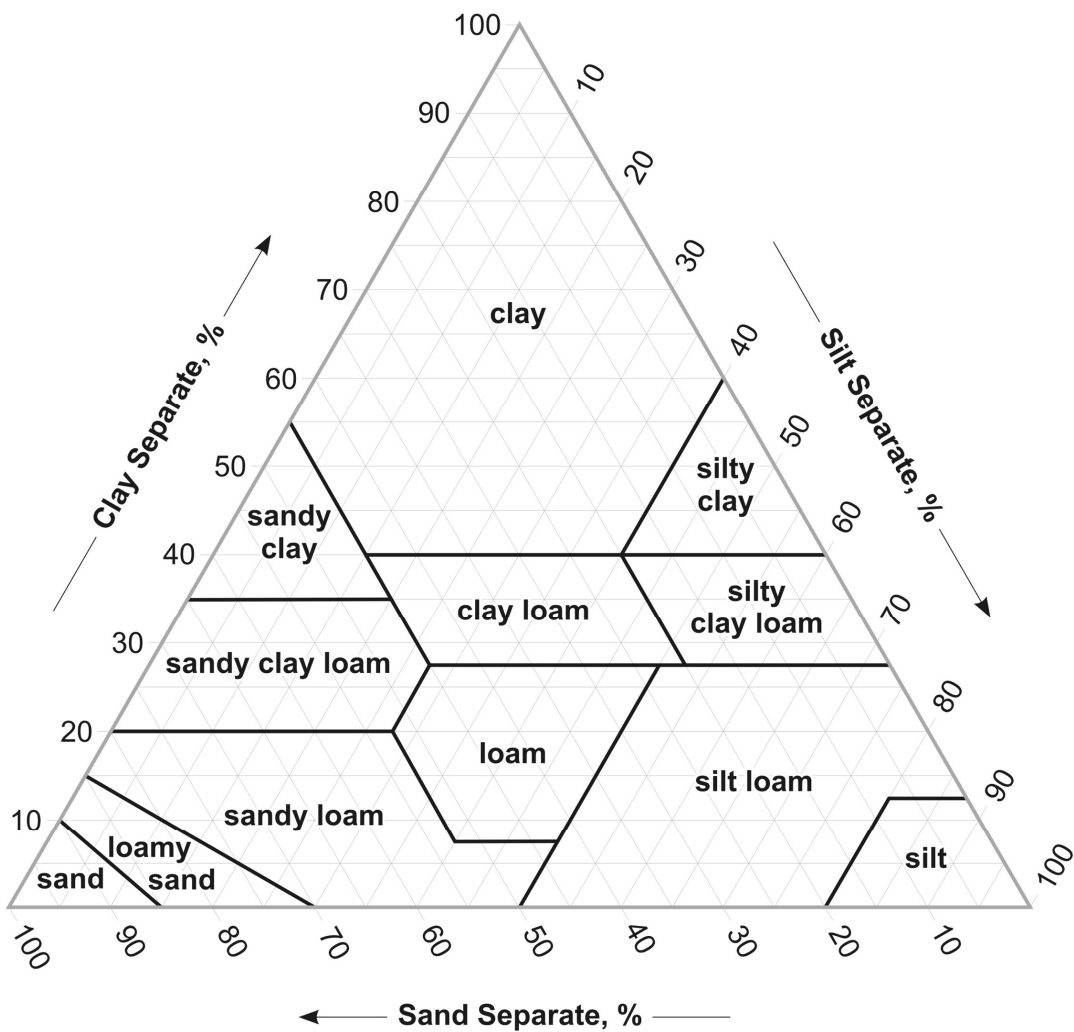


Figura 3.48. Triángulo textural del USDA (2014b)

3.6. ESTIMACIÓN DE LA MASA DE SEDIMENTOS RETENIDOS Y DE LA EROSIÓN

Una vez obtenido el volumen de sedimentos retenidos y la densidad aparente de la cuña, se obtiene la masa de sedimentos retenidos en la cuña de sedimentación (SW), aplicando la fórmula:

$$SW (t) = V (m^3) \cdot D_a (t \cdot m^{-3})$$

Con esta información, y conociendo la fecha de construcción del dique y la superficie de aporte de sedimentos a esa hidrotecnia se puede estimar el umbral mínimo de erosión de la zona de estudio, definido por la parte de los sedimentos retenidos, pero no por la totalidad de sedimentos que se han emitido. Por consiguiente, este valor de erosión, medido en toneladas por hectárea y año, se corresponde con la tasa de erosión retenida (conocida en la bibliografía en inglés como *sediment yield* (SY) o *specific sediment yield* (SSY) (Bellín *et al.*, 2011; Sougnez *et al.*, 2011; Romero *et al.*, 2012), y por tanto no emitida a los cauces ubicados aguas abajo de la restauración hidrológico-forestal, y se ha determinado aplicando la siguiente ecuación:

$$SY (t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}) = \frac{SW (t)}{T (años) \cdot S (ha)}$$

3.7. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRAMPA DE LOS DIQUES DE RETENCIÓN (*TRAP EFFICIENCY*)

La tipología del dique influye en la capacidad de retención de los sedimentos, de forma que parte de los sedimentos serán emitidos aguas abajo y parte quedarán retenidos formando parte de la cuña de sedimentos. La diferenciación entre sedimentos emitidos y retenidos es clave en este trabajo, ya que por medición del volumen de la cuña de sedimentos únicamente se estima la parte de erosión retenida, pero no la totalidad de la erosión en la zona de estudio ni la parte correspondiente a la emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración.

Los diques proyectados en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles son diques gavionados, que permiten que los sedimentos más finos atraviesen los espacios entre las piedras de las jaulas que conforman los gaviones. Dado que no retienen la totalidad de material sedimentado resulta necesario calcular la eficiencia de trampa, conocida como TE por sus siglas en inglés (*Trap Efficiency*), ya que el valor calculado aplicando la metodología expuesta se refiere exclusivamente a la parte de sedimentos que los diques han sido capaz de retener. La TE es una función que relaciona la capacidad de almacenamiento de la hidrotecnia, la superficie de aportación de sedimentos y las características del flujo o escorrentía (Brune, 1953). Varios autores, como Verstraeten & Poesen (2000, 2001) y Brown & Jarvis (1943), han descrito la TE . En este trabajo se



ha aplicado la fórmula propuesta por Brown & Jarvis (1943) para determinar la TE de cada uno de los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles. Brown & Jarvis (1943) define la TE como una relación entre la capacidad de almacenamiento del embalse y la zona de captación, a través de la siguiente ecuación:

$$TE = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + 0,0021 D \frac{C}{W}} \right)$$

Donde C es la capacidad de almacenamiento de la hidrotecnia (m^3) (tendrá distinto valor en función de la metodología empleada, A, B o C), W es la superficie de la cuenca de aportación de sedimentos (km^2), y los valores de D varían de 0,046 a 1, dependiendo de las características del depósito. Brown & Jarvis (1943) sugieren valores de D cercanos a 1 para hidrotecnias situadas en zonas de escorrentía baja y variable y para aquellos que retienen y almacenan los flujos de inundación, mientras que USACE (1989) lo recomienda para zonas con pequeños tiempos de retención. En la zona de estudio, la escorrentía aparece en sucesos de alta intensidad de lluvia pero baja frecuencia, y el tiempo de retención es bajo debido a que los diques son permeables y la tasa de infiltración es alta. Por ello, para este trabajo se ha aplicado para D un valor de 1, teniendo en cuenta que en la zona la escorrentía es variable y baja ya que son suelos muy arenosos con una alta capacidad de infiltración ($424,98 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ de media en 14 puntos de muestreo (Mongil, 2014b, Com. Pers.)).

3.7.1. TRATAMIENTO DEL PARÁMETRO W DE LA TE : CUENCA DE APORTACIÓN

Uno de los parámetros que se precisan para el cálculo de TE es la superficie de la cuenca de aportación de sedimentos al dique (W). Sin embargo, los diques que se encuentran en una misma cárcava trabajan conjuntamente en esta retención, de forma que los sedimentos que no retiene el primero porque se escapan los puede retener el segundo, y así sucesivamente, de aguas arriba a aguas abajo. Además, algunos diques se encuentran totalmente aterrados (el 30,08% de los diques), por lo que en la actualidad no retienen sedimentos, y se desconoce desde qué momento. Por estos motivos, se plantean dos modelos de tratamiento de las cuencas de aportación:

- Modelo 1: Cuencas individuales
- Modelo 2: Cuenca única

3.7.1.1. Modelo 1: cuencas individuales

Este modelo trabaja con las cuencas individuales de aportación de cada dique, sin considerar si el dique superior se encuentra o no aterrado. De este modo, el dique situado aguas arriba tiene una superficie de aportación S_1 y un volumen de sedimentos V_1 . Sin embargo, el segundo dique y siguientes pueden encontrarse en dos situaciones:



- Si el dique 1 está colmatado significa que estuvo reteniendo sedimentos hasta el momento de colmatación. A partir de ese momento, el dique 1 no puede retener más sedimentos, y por tanto es el siguiente dique el que los recibe. No obstante, surge el problema de conocer ese momento, y por tanto surge el problema de conocer qué parte de los sedimentos corresponde a antes y qué parte a después de la colmatación. O dicho de otra forma, no se puede añadir a la superficie de aportación del dique 2 la correspondiente al dique 1 ya que ha habido un tiempo en el que estas superficies eran independientes. Además siempre hay una parte de los sedimentos que recibe cada dique, que no son retenidos por éste, y esa parte vendrá definida por su eficiencia de trampa. Esto quiere decir que incluso hasta el momento de la colmatación completa del dique 1, el dique 2 ha recibido los sedimentos que el primero no ha retenido. Y por último, también hay que considerar los sedimentos producidos en la propia superficie de aportación del dique 2 (S_2). Este mismo razonamiento es válido para el resto de diques colmatados de la cárcava, considerando la sucesión en sentido aguas abajo. Cuando se trate de un dique no colmatado, se sigue el razonamiento del apartado siguiente.
- Si el dique 1 (o cualquier otro dique de la sucesión) no está colmatado, sólo pasan al dique 2 (o dique siguiente) un porcentaje de sedimentos igual a $100 - TE$ (%), más los que se formen en S_2 .

De estas consideraciones se obtiene que la aportación de sedimentos a cada dique no sólo depende de la superficie de su propia cuenca de aportación, sino que también influye el estado de aterramiento del dique o diques ubicados aguas arriba del estudiado y de la TE de cada uno.

Sin embargo, por un lado no se puede conocer el momento del completo aterramiento, y por otro, la fórmula para calcular la eficiencia de la trampa (TE) sólo toma como parámetros la superficie de aporte de sedimentos y la capacidad de almacenamiento de cada dique, pero ningún parámetro relativo a su grado de aterramiento. Por tanto, en este modelo cada dique tendrá su cuenca de aportación (el dique 1 la superficie de aportación S_1 , el dique 2 la superficie S_2 , y así sucesivamente (Figura 3.49)), sin que haya solapamientos entre estas superficies cuando coinciden en una misma cárcava.

No obstante, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos del modelo se extraen de una aproximación, aunque es la mejor aproximación posible con los métodos, información y herramientas disponibles.

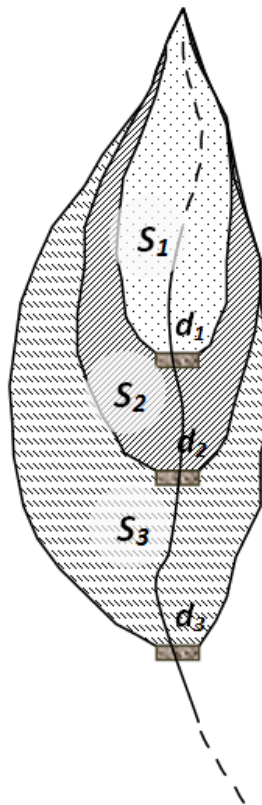


Figura 3.49. Modelo 1 para la determinación de TE (cuencas individuales). En la figura, S_1 , S_2 y S_3 son las superficies de aportación de los diques d_1 , d_2 y d_3 , respectivamente.

3.7.1.2. Modelo 2: cuenca única

Este modelo considera un único dique en cada cárcava, un dique ficticio situado en el lugar donde se encuentra el dique último (en sentido aguas abajo), que recogerá todos los sedimentos que reciba el conjunto de los diques de la cárcava (Figura 3.50). Si una cárcava tiene bifurcaciones o si confluye en otra cárcava, el dique ficticio recogerá los sedimentos de las bifurcaciones o de las cárcavas que confluyan en ésta. Es decir, aguas abajo de este dique ficticio no habrá ningún otro que recoja sedimentos los sedimentos que éste no hubiera retenido.

Al existir únicamente un dique, habrá exclusivamente una cuenca de aportación. Los datos de este dique a efectos del cálculo de TE son los siguientes:

- Superficie de aportación $W_u = \sum W_i$
- Capacidad de almacenamiento $C_u = \sum C_i$
- Volumen de sedimentos $V_u = \sum V_i$

El estudio de la TE de los diques de la restauración hidrológico-forestal se realiza aplicando ambos modelos, cuyos resultados son analizados y comparados. No obstante, los datos que ofrece el modelo 2 son valores totales para la restauración, por lo que es necesario trabajar con la totalidad de los diques ejecutados, tanto los que se

han medido directamente en campo como los que no se han podido medir. Para conocer los datos estos últimos se realiza un modelo de regresión que permita estimar su capacidad de almacenamiento.

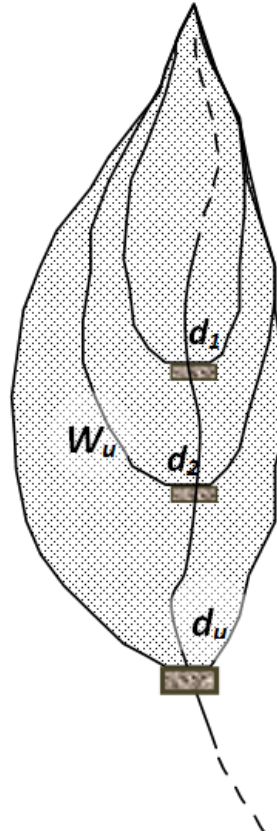


Figura 3.50. Modelo 2 para la determinación de TE (cuenca única). En la figura, W_u es la superficie de aportación del diques ficticio d_u , que engloba las superficies de los tres diques (el ubicado donde el actual dique d_u y los diques d_2 y d_3).

En estos dos modelos se ha tratado del aporte de sedimentos respecto de su cuenca de aportación, pero hay que indicar que si la cuenca está reforestada el aporte de sedimentos será baja, mientras que en aquellas cuencas que no se encuentran reforestadas o sólo parcialmente, el aporte será mayor. En la zona de estudio la reforestación de la cuenca se llevó a cabo tras la construcción de los diques de retención, por lo que hasta que se haya conseguido una vegetación lo suficientemente enraizada, el aporte de sedimentos ha debido ser bastante importante.

3.8. DETERMINACIÓN DE LA TASA DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS Y TASA TOTAL DE SEDIMENTOS

La determinación de la emisión real con respecto a la que hubiera supuesto la ausencia de este proyecto de restauración (medida como erosión retenida) permitirá estimar la eficacia de los diques y su influencia aguas abajo, tanto en la calidad de las aguas,

como en el estado de los acuíferos de la zona, y en el estado de colmatación del embalse de Santa Teresa, ubicado aguas abajo del área de la restauración.

A partir del valor de TE se ha determinado la cantidad de sedimento retenido y, por tanto, la tasa de emisión de sedimentos de cada uno de los diques, a través de las ecuaciones siguientes:

$$TSY = \frac{SY}{TE}$$

$$SE = TSY - SY$$

Donde TSY ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) es la tasa total de sedimentos (en inglés, *total sediment yield*), SY ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) es la tasa de sedimentos retenidos (*sediment yield*), obtenido de la aplicación de la metodología propuesta, TE (%) es la eficiencia de trampa (*trap efficiency*) y SE ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) es la tasa de emisión de sedimentos (*sediment emission*) (Figura 3.51).

Conocer la tasa de emisión de sedimentos actual con respecto a la emisión de sedimentos que existiría de no haberse llevado a cabo el proyecto de restauración es especialmente importante para conocer las implicaciones aguas abajo de estos trabajos en cuanto a los efectos sobre el aterramiento de embalses y sobre la fauna piscícola.

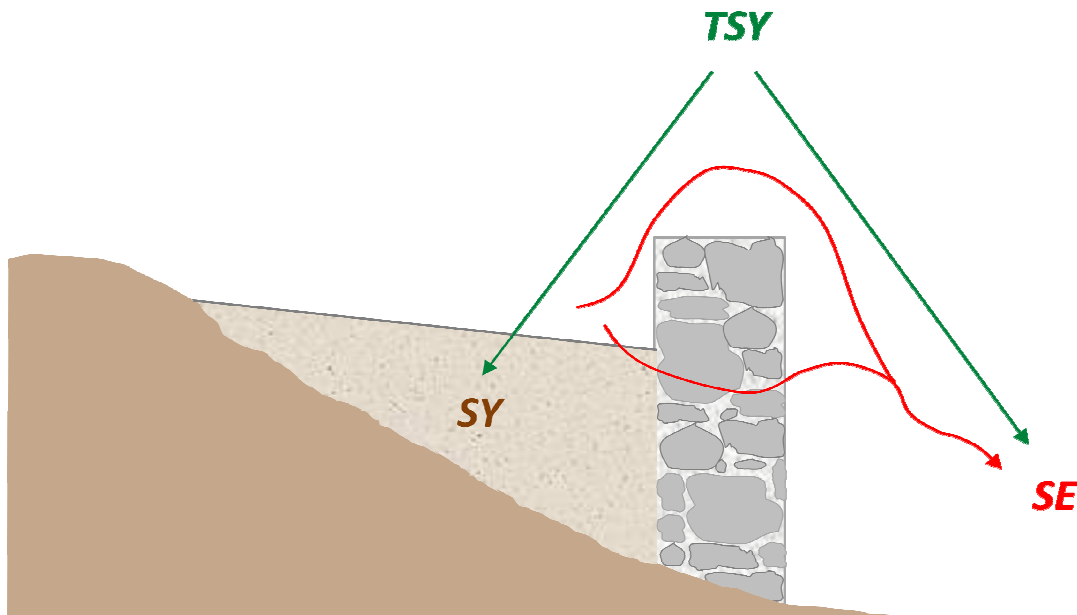


Figura 3.51. Relación entre la tasa total de sedimentos (TSY), la tasa de sedimentos retenidos (SY) y la tasa de emisión de sedimentos (SE)



3.9. DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE ACTUAL DE LA CUÑA DE SEDIMENTOS

Se ha realizado la determinación de la pendiente actual de la cárcava debido al asentamiento de la cuña de sedimentos. Se trata de una pendiente modificada respecto a la pendiente original que poseía la cárcava en este tramo. Así mismo se ha determinado la pendiente original gracias a la estimación del lecho original sobre el que se asienta la cuña. La diferencia entre ambas mediciones informa de la reducción que ha sufrido la pendiente gracias a la construcción del dique. Además se analiza si se ha conseguido la pendiente de equilibrio, definida como aquella en la que el torrente ha alcanzado su estabilidad en el lecho. Este análisis permitirá conocer los cambios geomorfológicos que ha sufrido la zona gracias a la restauración hidrológico-forestal, y los efectos que estos cambios hayan tenido en la dinámica de sedimentos aguas abajo de la restauración.

La estimación del lecho original sobre el que se asienta la cuña de sedimentos permite obtener la pendiente original (PO), que se corresponde con el porcentaje resultante de dividir la diferencia de cotas entre el extremo de la cuña ($H_{máx}$) y el punto de menor cota aguas abajo del dique ($H_{mín}$), entre la longitud entre ambos puntos en su proyección horizontal, es decir, la distancia horizontal o reducida (L):

$$PO (\%) = \frac{H_{máx} - H_{mín}}{L} \cdot 100$$

La pendiente actual (PA) de la cuña de sedimentos se ha obtenido a partir de las mediciones directas en campo con la estación total, obteniendo lo que denominamos pendiente modificada, que se corresponde con la pendiente de equilibrio en aquellos diques que se encuentren con una pendiente estable, denominada por algunos autores pendiente de compensación en aquellos casos en los que la composición granulométrica del lecho sea igual a la composición granulométrica de los acarreos (García-Nájera, 1943) (Figura 3.52). En los diques que se encuentren completamente aterrados, el punto de mayor cota ($H_{máx}$) (extremo superior de la cuña de sedimentación) coincidirá con el de la pendiente original; el punto de menor cota ($H_{mín}$) se tomará de la sección de la cuña en contacto con el dique; y la longitud (L) se corresponderá con la distancia reducida entre estos dos puntos.

La pendiente modificada de la cuña de sedimentos de cada dique se ha comparado con la pendiente original del cauce sobre el que se asienta, con el fin de conocer la repercusión geomorfológica de estas obras de corrección hidrológica.

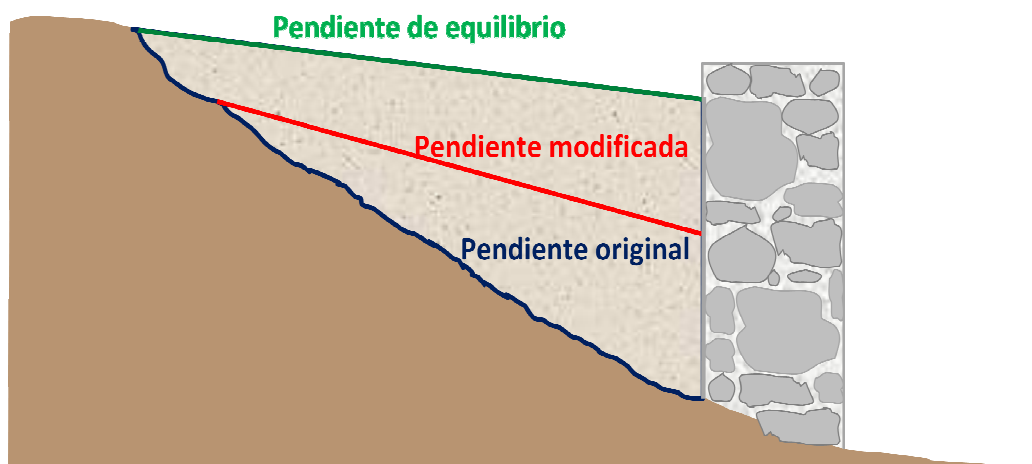


Figura 3.52. Pendiente de equilibrio, pendiente modificada y pendiente original de la cuña de sedimentos

3.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.10.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Se ha realizado un análisis de estadística descriptiva de las principales variables estudiadas, así como de las variables accesorias necesarias para el cálculo de las primeras, empleando el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI. Los parámetros estadísticos analizados son los siguientes:

- Media aritmética
- Mediana
- Desviación típica
- Varianza
- Coeficiente de variación
- Mínimo
- Máximo
- Rango
- Sesgo estandarizado
- Curtosis
- Curtosis estandarizada
- Intervalos de confianza para la media y para la desviación típica

Las principales variables de estudio se han calculado para los 113 diques de la muestra y con las tres metodologías planteadas: metodología propuesta (A), metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007) (B) y metodología propuesta por Romero *et al.* (2007a) (C). Las variables de estudio son las siguientes:

- Volumen de sedimentos (m^3): V_A , V_B y V_C , calculadas por aplicación directa de cada metodología.
- Masa de sedimentos (t): SW_A , SW_B y SW_C , calculadas por el producto entre el volumen de sedimentos obtenido de cada metodología y la densidad aparente media de cada cuña de sedimentos (variable accesorio).



- Tasa de erosión retenida ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$): SY_A , SY_B y SY_C , calculadas considerando la masa de sedimentos, la cuenca de aportación individual de cada dique (variable accesoria) y el tiempo transcurrido desde la construcción del dique y la medición de su cuña de sedimentos (48 años en todos los casos).
- Eficiencia de trampa (%): TE_A , TE_B y TE_C , calculadas por aplicación de la fórmula propuesta por Brown & Jarvis (1943).
- Tasa de emisión de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$): SE_A , SE_B y SE_C , calculadas por aplicación de la eficiencia de trampa.
- Tasa total de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$): TSY_A , TSY_B y TSY_C , calculadas por la suma entre la tasa de retención y la tasa de emisión de sedimentos.

Se han analizado además otras variables consideradas importantes para uno de los objetivos de este trabajo, que han sido calculadas gracias a la aplicación de la metodología propuesta y al trabajo topográfico de campo:

- Pendiente original (PO , %): calculada a partir de la estimación de la cárcava o del cauce original.
- Pendiente actual (PA , %): pendiente de equilibrio para aquellos diques completamente aterrados y pendiente modificada para el resto, denominada en el tratamiento conjunto de los datos pendiente actual (PA).
- Reducción de la pendiente (RP , %): calculada como la diferencia entre la pendiente original y la pendiente actual conseguida gracias al proyecto de restauración.

Así mismo, en este trabajo se han utilizado una serie de variables accesorias. Se trata de variables utilizadas en el cálculo del volumen por las metodologías estudiadas, en la determinación del peso de los sedimentos retenidos y en la estimación de las diversas tasas de erosión. Son las siguientes:

- Capacidad de almacenamiento (m^3): C_A , C_B y C_C , calculadas con cada metodología bajo el supuesto de aterramiento total de cada dique. Es un dato necesario para calcular la eficiencia de trampa.
- Altura de aterramiento (m): AA , determinada por aplicación de la metodología propuesta, y necesaria para la aplicación de las metodologías de Castillo *et al.* (2007) y Romero *et al.* (2007a).
- Longitud de la cuña (m): LC , al igual que la anterior, determinada por aplicación de la metodología propuesta, y necesaria para la aplicación de las metodologías de Castillo *et al.* (2007) y Romero *et al.* (2007a).
- Superficie individual de la cuenca de aportación de sedimentos (m^2): SI , calculada de forma individual para cada dique, siguiendo el modelo 1 explicado anteriormente en el apartado 3.7.1.1.
- Densidad aparente ($t \cdot m^{-3}$): Da , determinada por aplicación del método del cilindro y calculada como la media entre las dos muestras tomadas en cada cuña de sedimentos.



3.10.2. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y REGRESIÓN

Se ha realizado un análisis de correlación para estudiar la relación entre la cantidad de sedimentos retenidos en los diques y las siguientes variables:

- Altura útil del dique (AU , m): coincide con la altura máxima posible de colmatación
- Altura del aterramiento (AA , m): altura de la cuña de sedimentos en contacto con el dique.
- Ancho de la cuña (AC , m): anchura media de la cuña de sedimentos.
- Longitud de la cuña de sedimentos (LC , m): medida en superficie.
- Longitud del dique (LD , m): se corresponde con la parte del dique en contacto con la cuña, en sentido transversal.
- Altura útil · longitud de la cuña ($AU \cdot LD$, m^2)
- Pendiente original (PO , %): pendiente original de la cárcava en el tramo en el que se asienta la cuña de sedimentos.
- Superficie individual de la cuenca de aportación (SI , m^2): En cárcavas en las que se ubican varios diques, la superficie individual de aportación del dique ubicado aguas abajo se corresponde con su superficie de aportación menos la superficie de aportación del dique ubicado aguas arriba. Se trata de diques conectados, de forma que los sedimentos que retiene el dique superior no llegan al dique inferior, por lo que no sería adecuado tomar superficies de aportación completas.
- Superficie de vegetación cubierta (SV , %): Superficie cubierta de vegetación con respecto a la superficie individual de la cuenca de aportación de cada dique.

Así, empleando el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI, se han obtenido las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada variable indicada y la variable "Volumen de la cuña de sedimentos" (V_A). El rango de estos coeficientes de correlación varía de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables, y el P-valor prueba la significación estadística de las correlaciones estimadas.

A partir del análisis de correlación se ha realizado un análisis de regresión entre las variables con mayor correlación con el volumen de la cuña de sedimentos: regresión simple para cada variable de mayor correlación y el volumen de la cuña, y regresión múltiple para combinaciones de más de una variable con el volumen de la cuña de sedimentos. Para cada ecuación de regresión se ha obtenido el valor del parámetro R^2 , de forma que aquellas con valores de R^2 más cercanos a 1 son las más significativas.

3.10.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS DE LOS DIQUES NO MEDIDOS

De los 123 diques construidos finalmente en la restauración de Tórtoles, se han podido medir, y por tanto se ha podido aplicar la metodología propuesta, a 113 diques, es decir, al 91,87% de los diques. Los motivos por los que no se han podido medir estos 10 diques restantes son, en 9 diques, la imposibilidad de acceso, visualización y medición de la cuña de sedimentos por secciones transversales, tal y como requiere la

metodología propuesta, y en el dique restante, el motivo es que se trata de un dique en el que se ha cementado el paramento aguas arriba y el lugar donde debería haberse formado la cuña de sedimentos (Figura 3.53). La razón de que se cementase este dique es su empleo como depósito para el abastecimiento de agua al pueblo, antes de que se hiciera la nueva captación y depósito. El cemento cubre una amplia superficie, y para poder convertirlo en balsa se tuvo que hacer un vaciado de sedimentos, además de vaciados sucesivos para impedir la merma de la capacidad del embalse, por lo que no es posible la medición de una cuña de sedimentos como en el resto de los diques, y su volumen de sedimentos se considera a efectos de este trabajo igual a 0. Por tanto, en 9 de esos 10 diques se ha estimado el volumen de la cuña de sedimentos a partir de la ecuación de regresión más significativa de entre las obtenidas en el apartado anterior, y utilizando datos reales de los diques cuya cuña se desea estimar.



Figura 3.53: Dique cementado (dique 86)

3.10.4. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS

Para hacer una comparación estadística completa, se realiza un análisis estadístico con el programa Statgraphics Centurion XVI. En concreto se ha realizado una comparación de las variables medidas con la metodología propuesta, la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007), y la metodología propuesta por Romero *et al.* (2007a). Las variables comparadas son las siguientes:

- Volumen de sedimentos (m^3): V_A , V_B y V_C
- Masa de sedimentos (t): SW_A , SW_B y SW_C
- Tasa de erosión retenida ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$): SY_A , SY_B y SY_C
- Eficiencia de trampa (%): TE_A , TE_B y TE_C
- Tasa de emisión de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$): SE_A , SE_B y SE_C
- Tasa total de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$): TSY_A , TSY_B y TSY_C



En primer lugar se realiza un análisis de la varianza (ANOVA), para determinar si hay diferencias significativas entre las medias de cada variable de estudio. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples indican qué medias son significativamente diferentes de otras. Si las muestras no cumplen la hipótesis de normalidad, se realiza, asimismo, la prueba de Kruskal-Wallis, que compara las medianas en lugar de las medias, y la prueba de Levene para determinar la igualdad o no de las desviaciones estándar. En los casos en los que se encuentran diferencias entre las medianas, se aplica la mediana de Mood, un caso especial de la prueba de chi-cuadrado de Pearson. Asimismo, se realizan gráficos de dispersión para analizar la correlación entre las metodologías estudiadas.

3.10.5. ANÁLISIS DE LA PENDIENTE ACTUAL

Se ha realizado un análisis de correlación estudiar la relación entre la pendiente actual (PA) de la cuña de sedimentos de los diques de la restauración de Tórtoles y las siguientes variables:

- Pendiente original (PO , %)
- Altura del aterramiento (AA , m): altura de la cuña de sedimentos en contacto con el dique.
- Longitud de la cuña de sedimentos (LC , m) medida en superficie.
- Altura útil del dique (AU , m): máxima altura del dique capaz de almacenar sedimentos.
- Altura útil · longitud de la cuña ($AU \cdot LD$, m^2)
- Superficie de vegetación cubierta (SV , %): Superficie cubierta de vegetación con respecto a la superficie de la cuenca de aportación individual de cada dique.

En concreto se han analizado las correlaciones momento producto de Pearson entre cada variable indicada y la variable "Pendiente actual" (PA). El rango de estos coeficientes de correlación varía de -1 a +1, de forma que la fuerza de la correlación es mayor en los extremos (valores cercanos a +1 o -1, siendo en caso negativo una correlación inversa, y el P-valor prueba la significación estadística de las correlaciones estimadas. Además se ha realizado un estudio de las variables para obtener un modelo de regresión múltiple que sea válido para describir la pendiente actual.

Sin embargo, el 30,08% de los diques de la restauración de Tórtoles se encuentran completamente aterrados, y se desconoce desde qué momento se encuentran en esta situación. Esta cuestión puede influir en la pendiente, de forma que la pendiente actual en relación con las variables estudiadas se comporte de distinta manera en diques completamente aterrados y en diques aterrados tan sólo parcialmente. Por ello se ha realizado un análisis de correlación en ambas situaciones para determinar la validez del estudio conjunto o clasificado de los datos. No obstante, se considera de forma que se trata de pendientes de compensación, pendientes estables o pendientes en equilibrio, ya que o bien el torrente ni erosiona ni sedimenta, o bien la cantidad de material erosionado equivale a la cantidad de material sedimentado, y por tanto se encuentran en equilibrio.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos en cuanto al volumen de sedimentos por aplicación de la metodología propuesta, así como la estimación de una ecuación de regresión que permita determinar el volumen de la cuña de sedimentos en aquellos diques cuya medición en campo no sea posible. Así mismo, se comparan los resultados obtenidos con esta metodología y los que se obtendrían por aplicación de otras dos metodologías propuestas por otros autores. Partiendo de estos resultados se obtienen y analizan otras variables derivadas: masa de sedimentos, tasa de erosión retenida, tasa de emisión de sedimentos y tasa total de sedimentos; así como las variables necesarias para su obtención: densidad aparente, eficiencia de trampa, superficie individual de la cuenca de aportación, etc. Por último, se examinan los cambios geomorfológicos que han sufrido las cárcavas y barrancos de Tórtoles a través de los resultados obtenidos sobre los cambios de pendiente ocasionados por la restauración hidrológico-forestal.

4.1. VOLUMEN DE SEDIMENTOS RETENIDOS

Los diques de retención ofrecen información sobre la dinámica y producción de sedimentos y las tasas de erosión de las cuencas en que se ubican (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b). En este sentido, son muchos los autores que han utilizado la información que proporciona la cuña de sedimentos, y en concreto su volumen, para conocer las tasas de erosión existentes en la zona de estudio (McManus & Duck, 1985; Van den Wall Bake, 1986; Neil & Mazari, 1993; Foster & Walling, 1994; White *et al.*, 1996; Romero *et al.*, 2007a; Boix-Fayos *et al.*, 2008; Sougnez *et al.*, 2011; Bellin *et al.*, 2011; Bussi *et al.*, 2012). Los resultados varían de unas cuencas a otras, y su valor, de acuerdo con Marston & Dolan (1999) suele estar estrechamente relacionado con la pendiente, la densidad de la vegetación y la textura del suelo.

Desde mediados del siglo XX se emplean los volúmenes de sedimentos retenidos para estimar la tasa media de sedimentos de la cuenca por comparación con los resultados de ecuaciones empíricas (Geiger, 1957; Ackermann & Corinth, 1962; Rohel, 1962; Farnham *et al.*, 1966; Callander & Duder, 1979; Jolly, 1982; Le Roux & Roos, 1982; Duck & McManus, 1993; Avendaño-Salas *et al.*, 1995, 1997b; Verstraeten *et al.*, 2003; Tian *et al.*, 2013). Más recientemente se utiliza el volumen total de sedimentos retenidos para calibrar o validar modelos matemáticos (De Vente *et al.*, 2005, 2008; Alatorre *et al.*, 2010), o con algunas variaciones (Bussi *et al.*, 2013) plantean el modelo TETIS, y lo calibran, además, con volúmenes asociados a eventos de inundaciones). También se han planteado métodos para cubicar la cuña de sedimentos. Se trata de métodos geoméricamente muy simples (Lien, 2003; May & Gresswell, 2003; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Boix-Fayos *et al.*, 2008), que, tal y como se expone en este trabajo, subestiman los sedimentos retenidos en los diques (*SY*), así como la eficiencia de trampa (*TE*) y, por tanto, la tasa de erosión de la cuenca (*TSY*). Sin embargo, aunque sean sencillos de aplicar, para conocer el efecto de los diques es necesario estimar con mayor exactitud los valores reales de erosión y emisión de sedimentos (*SE*).



El método elegido para este estudio (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b), que combina trabajo topográfico de precisión y cálculos analíticos, ofrece una estimación más realista y rigurosa de la producción de sedimentos. Esta metodología es empleada para la medición de las cuñas de sedimentos retenidas por 113 diques de los 123 diques construidos en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles, es decir, el 91,87% de los diques. No se aplica a la totalidad de los diques debido a que no se pudieron medir las cuñas de los 10 diques restantes, principalmente por la dificultad de acceso y visualización de la cuña de sedimentación. Los resultados del cálculo del volumen de sedimentos en estos 113 diques, aplicando la metodología propuesta en este trabajo (metodología A), se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Volumen de los diques de la restauración obtenido de la aplicación de la metodología propuesta (V_A , m^3)

Dique	V_A (m^3)	Dique	V_A (m^3)	Dique	V_A (m^3)	Dique	V_A (m^3)
1	4,07	32	77,42	63	135,92	94	13,14
2	2,18	33	33,99	64	5,98	95	34,08
3	2,39	34	11,10	65	2,82	96	15,81
4	54,69	35	16,77	66	1,84	97	9,38
5	45,59	36	15,84	67	1,63	98	45,49
6	15,68	37	4,73	68	9,41	99	28,12
7	3,21	38	1,05	69	40,70	100	29,31
8	5,10	39	48,69	70	5,17	102	525,85
9	3,04	40	11,68	71	7,95	103	1.701,52
10	1,17	41	21,28	72	24,14	104	88,35
11	8,42	42	1,96	74	5,30	105	49,81
12	1,78	43	8,86	75	7,58	106	29,05
13	8,12	44	14,73	76	5,13	107	91,27
14	32,50	45	47,40	78	12,64	108	16,57
15	37,77	46	6,04	79	19,25	109	11,12
16	28,57	47	50,49	80	4,32	110	85,54
17	66,56	48	9,17	81	2,09	111	21,05
18	5,16	49	23,65	82	4,09	112	25,03
19	17,80	50	7,16	83	2,90	113	33,20
20	9,64	51	14,73	84	3,29	114	140,20
21	6,36	52	24,82	85	4,52	116	12,16
22	3,70	54	2,67	87	49,52	117	43,74
23	5,19	55	71,28	88	28,87	118	7,20
24	7,43	56	11,15	89	7,78	119	28,54
25	482,06	57	45,81	90	14,36	120	12,58
27	108,25	59	1,85	91	1,27	121	16,30
28	40,66	61	7,96	92	35,69	122	26,60
29	8,65	62	102,03	93	15,01	123	11,10
30	44,64						

El resumen del análisis estadístico para el volumen de la cuña de sedimentos calculado aplicando la metodología propuesta (V_A) se indica en la Tabla 4.2. El volumen medio retenido por cada dique es $47,49 m^3$, con una desviación típica de $171,63 m^3$. El valor mínimo es $1,05 m^3$ y el máximo $1.701,47 m^3$, es decir, el rango es bastante amplio. El sesgo estandarizado y la curtosis revelan desviaciones significativas de la normalidad

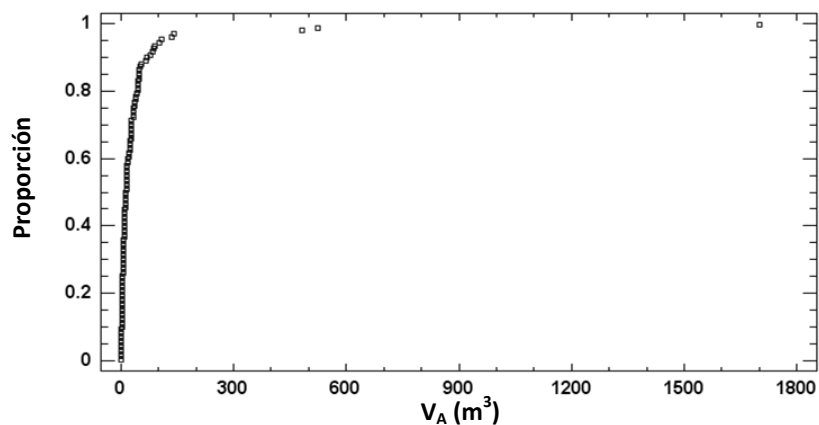
de la muestra. El estudio de los percentiles indica que la mitad de la muestra toma un valor inferior a $14,36 \text{ m}^3$ (mediana) (Tabla 4.3). El gráfico de cuantiles (Figura 4.1) muestra la agrupación de los datos en torno a valores bajos, dentro del intervalo (0,150); tan sólo existen tres valores que se alejan de este intervalo (Figura 4.1). La misma tendencia se observa en el gráfico de caja y bigotes (Figura 4.2).

 Tabla 4.2. Resumen estadístico del volumen de los diques (V_A, m^3)

	$V_A (\text{m}^3)$
Media aritmética	47,49
Mediana	14,36
Desviación típica	171,63
Varianza	29.455,77
Coefficiente de Variación (%)	361,43
Mínimo	1,05
Máximo	1.701,52
Rango	1.700,47
Sesgo Estandarizado	36,78
Curtosis	79,14
Curtosis Estandarizada	171,72
Intervalo de confianza para la media	15,50 – 79,48
Intervalo de confianza para la desviación típica	151,79 – 197,48

 Tabla 4.3. Percentiles del volumen de los diques (V_A, m^3)

	Percentiles
1%	1,17
5%	1,84
10%	2,67
25%	5,30
50%	14,36
75%	34,08
90%	71,28
95%	108,25
99%	525,85


 Figura 4.1. Gráfico de cuantiles del volumen de sedimentos (V_A, m^3)

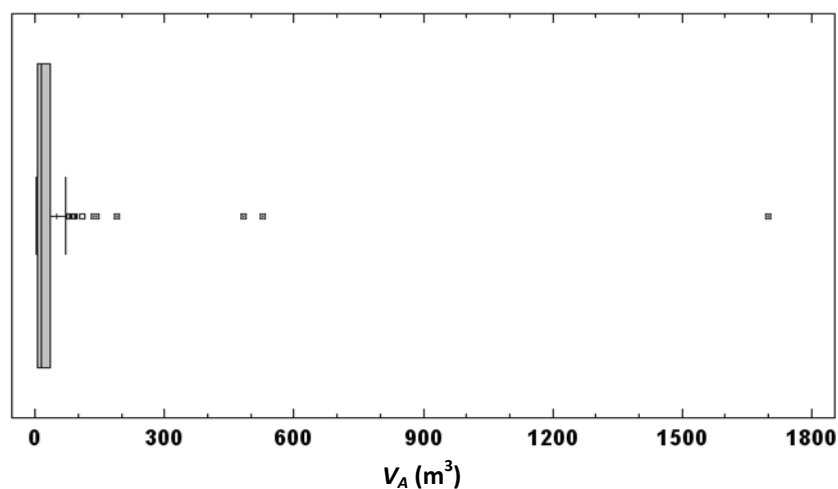


Figura 4.2. Gráfico de caja y bigotes para el volumen de sedimentos, determinado con la metodología propuesta (V_A , m^3)

En términos prácticos, puede establecerse, con un 95,0% de confianza, que la media verdadera del volumen V_A se encuentra entre 16,18 y 80,32 m^3 , en tanto que la desviación estándar verdadera está entre 152,18 y 197,98 m^3 . Sin embargo, como los datos no provienen de una distribución normal, mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, el intervalo para la desviación estándar puede ser incorrecto.

El histograma de frecuencias indica que gran parte de los diques retienen entre 0 y 50 m^3 (Figura 4.3). Se han seleccionado los diques de este rango para realizar un estudio eliminando los valores extremos (*outliers*). Este análisis muestra una mejor agrupación de los datos, tal y como se observa en el gráfico de caja y bigotes (Figura 4.4). Sin embargo, el sesgo estandarizado muestra desviación de la normalidad de la muestra, aunque la curtosis estandarizada sí que se encuentra dentro del rango que indica normalidad (Tabla 4.4).

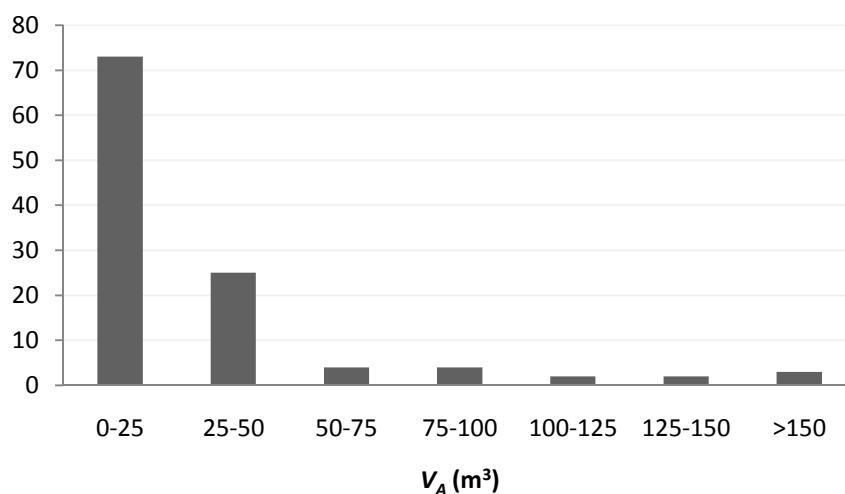


Figura 4.3. Histograma de frecuencias del volumen de sedimentos (V_A , m^3)

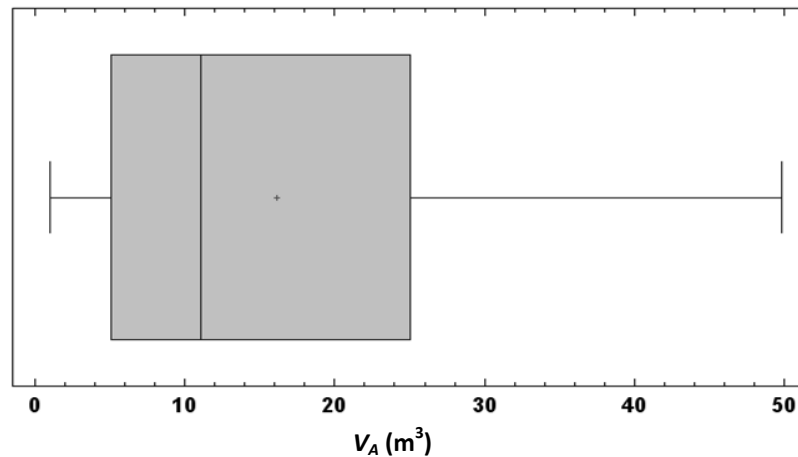

 Figura 4.4. Gráfico de caja y bigotes del volumen de sedimentos de una selección de diques (V_A , m^3)

 Tabla 4.4. Resumen estadístico del volumen de una selección de los diques (V_A , m^3)

	V_A (m^3)
Media aritmética	16,17
Mediana	11,11
Desviación típica	14,15
Varianza	200,23
Coefficiente de Variación (%)	87,52
Mínimo	1,05
Máximo	49,81
Rango	48,77
Sesgo Estandarizado	4,02
Curtosis	-0,18
Curtosis Estandarizada	-0,35
Intervalo de confianza para la media	13,33 - 19,01
Intervalo de confianza para la desviación típica	12,41 - 16,47

Como se ha expuesto anteriormente, la metodología propuesta no se ha podido aplicar a la totalidad de los diques. Para aquellos diques que no se han podido medir se propone un análisis de correlación y un análisis de regresión del volumen de sedimentos. El análisis de correlación para el volumen de sedimentos calculado con la metodología propuesta se ha realizado de acuerdo con las variables que se indican a continuación, cuya estadística descriptiva se muestra en la Tabla 4.5:

- Altura útil de cada dique (AU , m): medida hasta el vertedero. Se corresponde con la máxima altura del dique capaz de almacenar sedimentos.
- Altura del aterramiento (AA , m): altura de la cuña de sedimentación en contacto con el dique.
- Ancho de la cuña (AC , m): anchura media de la cuña de sedimentos.
- Longitud de la cuña de sedimentos (LC , m): longitud de la cuña medida en superficie.
- Longitud del dique (LD , m): se corresponde con la parte del dique en contacto con la cuña, en sentido transversal.



- Altura útil x longitud de la cuña ($AU \cdot LD$, m^2)
- Pendiente original (PO , %): pendiente original de la cárcava en el tramo en el que se asienta la cuña de sedimentos.
- Superficie individual de la cuenca de aportación (SI , m^2): En cárcavas en las que se ubican varios diques, la superficie individual de aportación del dique ubicado aguas abajo se corresponde con su superficie de aportación menos la superficie de aportación del dique ubicado aguas arriba. Se trata de diques conectados, de forma que los sedimentos que retiene el dique superior no llegan al dique inferior, por lo que no sería adecuado tomar superficies de aportación completas.
- Superficie cubierta de vegetación arbolada (SV , m^2): Superficie cubierta de vegetación con respecto a la superficie individual de la cuenca de aportación de cada dique.

Tabla 4.5. Estadística descriptiva de las variables utilizadas para el análisis de correlación y regresión del volumen de sedimentos (V_A , m^3)

	AU (m)	AA (m)	AC (m)	LC (m)	LD (m)	$AU \cdot LD$ (m^2)	PO (%)	SI (m^2)	SV (m^2)
Media aritmética	2,44	2,07	4,12	9,75	10,94	29,29	27,91	10.729,73	6.538,03
Mediana	2,15	1,86	3,40	7,60	10,05	23,22	27,15	1.980,03	998,00
Desviación típica	1,04	1,14	2,67	8,51	4,37	21,25	11,46	51.152,25	25.748,48
Coefficiente de Variación (%)	42,54	55,19	64,96	87,31	39,93	72,55	41,06	476,73	393,83
Mínimo	1,0	0,39	0,67	1,3	3,80	3,86	0,12	145,42	0,00
Máximo	5,3	6,41	14,40	69,0	25,0	96,20	69,33	531.943,72	237.063,54
Rango	4,3	6,02	13,73	67,7	21,2	92,34	69,21	531.797,30	237.063,54
Sesgo Estandarizado	2,72	4,19	6,57	17,11	4,06	5,05	2,09	42,04	32,96
Curtosis	-0,42	0,96	2,41	22,19	0,63	0,71	0,59	98,59	62,74
Curtosis Estandarizada	-0,91	2,07	5,24	48,15	1,42	1,55	1,29	213,92	136,14

AU (m): Altura útil de cada dique; AA (m): Altura del aterramiento; AC (m): Ancho de la cuña; LC (m): Longitud de la cuña de sedimentos; LD (m): Longitud del dique; PO (%): Pendiente original; SI (m^2): Superficie individual de la cuenca de aportación; SV (m^2): Superficie cubierta de vegetación

La Tabla 4.6 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada variable indicada y la variable "Volumen de la cuña de sedimentos" (V_A). Los resultados estadísticos demuestran que existe una gran correlación entre el volumen de la cuña de sedimentos y la superficie individual de la cuenca de aportación, así como con la longitud de la cuña y otros parámetros geométricos de la cuña, como la altura del aterramiento y el ancho de la cuña. Sin embargo, tanto la longitud como la altura y la anchura de la cuña son variables directamente relacionadas con su volumen y con sus mediciones de campo. De esto se obtiene que si el fin de estudiar estas correlaciones es obtener una ecuación de regresión que permita estimar el volumen del aterramiento en aquellos casos en los que no se puedan realizar mediciones de campo, no deberían emplearse variables que dependan de esta medición. Menor correlación,



aunque igualmente positiva, se observa entre el volumen retenido y la longitud y la altura útil del dique, así como con la superficie útil de retención, es decir, la superficie del dique que frena los sedimentos y que por tanto queda en contacto con la cuña de sedimentación. Por último hay que indicar que el P-valor, que prueba la significación estadística de las correlaciones estimadas, muestra que en los casos indicados las correlaciones son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Se muestran así mismo los gráficos que informan de la relación entre las variables (Figura 4.5). En el caso de la pendiente original y el porcentaje de superficie cubierta de vegetación arbolada, las correlaciones son muy bajas y el P-valor indica que no son significativas. En cuanto al porcentaje de superficie cubierta hay que indicar que la vegetación se ha ido desarrollando sucesivamente desde su plantación, de forma que en los primeros años la acción de esta vegetación frente a la erosión ha sido prácticamente nula, coincidiendo con el periodo durante el que se han retenido la mayor parte de los sedimentos. Para estudiar adecuadamente la relación entre ambas variables sería preciso conocer el volumen retenido por los diques en distintos intervalos de tiempo en los que se conozca el incremento de superficie cubierta, información de la que no se dispone.

Tabla 4.6. Análisis de correlación entre el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , m^3) y las variables indicadas

	AU (m)	AA (m)	AC (m)	LC (m)	LD (m)	AU·LD (m^2)	PO (%)	SI (m^2)	SV (%)
Correlación (R)	0,3790	0,5220	0,4362	0,8252	0,1939	0,3181	-0,1759	0,9122	-0,0791
P-valor	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0396	0,0006	0,0623	0,0000	0,4050

AU (m): Altura útil de cada dique; AA (m): Altura del aterramiento; AC (m): Ancho de la cuña; LC (m): Longitud de la cuña de sedimentos; PO (%): Pendiente original; SI (m^2): Superficie individual de la cuenca de aportación; SV (%): Superficie cubierta de vegetación respecto de la superficie de cada cuenca

A partir de este estudio, se realiza un análisis de regresión entre las variables con mayor correlación con el volumen de sedimentos. Los resultados del análisis de regresión simple se muestran en la Tabla 4.7, y los resultados del análisis de regresión múltiple se muestran en la Tabla 4.8. De los resultados se obtiene que la ecuación que relaciona el volumen de la cuña de sedimentos con la superficie individual de la cuenca de aportación posee un buen ajuste, con un coeficiente de regresión de 0,8459. La longitud de la cuña de sedimentos posee un mayor coeficiente de regresión; sin embargo, tal y como se ha expuesto anteriormente, esta variable está relacionada con el volumen de sedimentos al formar parte de la propia cuña, por lo que no resulta adecuada para estimar el volumen de diques cuya medición no es posible, pero sí sería útil para estimar el volumen en cuñas cuya medición completa no fuese posible o incluso para emplearlo en zonas similares y obtener el volumen de sedimentos haciendo unas simples mediciones de campo, de forma similar a otros autores, que emplean ambos parámetros, longitud de la cuña de sedimentos y altura del aterramiento, y asemejan la cuña a una figura geométrica para estimar el volumen de la cuña de sedimentos (Lien, 2003; May & Gresswell, 2003; Hernández *et al.*, 2004; Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Castillo *et al.*, 2007; Belmonte & Romero, 2009; Abedini *et al.*, 2012).

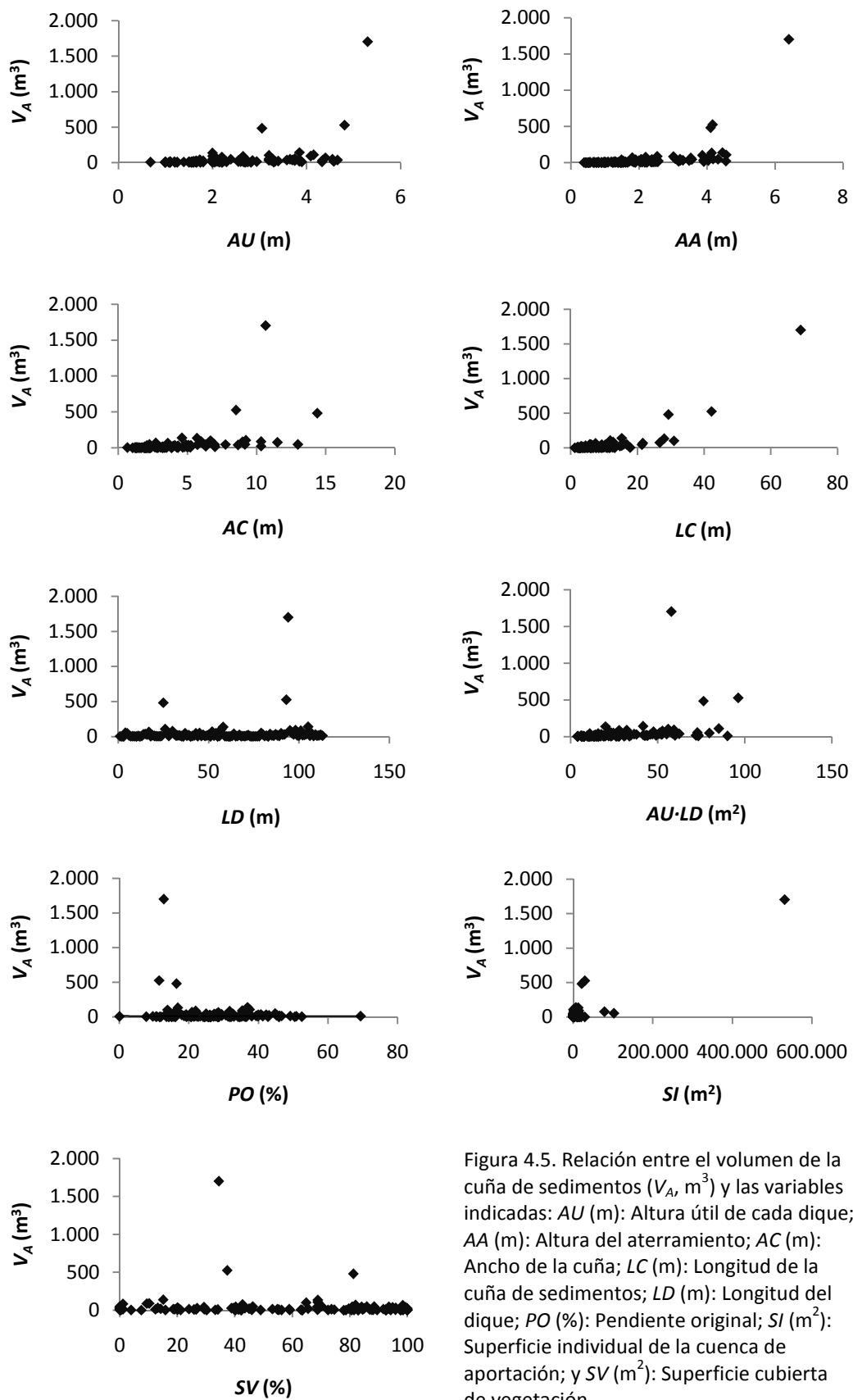


Figura 4.5. Relación entre el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , m^3) y las variables indicadas: AU (m): Altura útil de cada dique; AA (m): Altura del aterramiento; AC (m): Ancho de la cuña; LC (m): Longitud de la cuña de sedimentos; LD (m): Longitud del dique; PO (%): Pendiente original; SI (m^2): Superficie individual de la cuenca de aportación; y SV (m^2): Superficie cubierta de vegetación



Tabla 4.7. Análisis de regresión simple para el volumen de sedimentos V_A (m^3)

Variable dependiente	Variable independiente	Ecuación	R ²
V_A (m^3)	SI (m^2)	$V_A = 14,6462 + 0,00306068 \cdot SI$	0,8321
V_A (m^3)	SI (m^2)	$V_A = 24,244 + 0,00128323 \cdot SI + 3,49778 \cdot 10^{-9} \cdot SI^2$	0,8459
V_A (m^3)	SV (m^2)	$V_A = 11,4416 + 0,00551312 \cdot SV$	0,6841
V_A (m^3)	AA (m)	$V_A = e^{(0,733106 + 0,936156 \cdot AA^2)}$	0,6437
V_A (m^3)	LC (m)	$V_A = 35,1885 - 6,18227 \cdot LC + 0,434793 \cdot LC^2$	0,9495

V_A = Volumen de la cuña de sedimentos (m^3); SI = Superficie individual de la cuenca de aportación (m^2); AA = Altura del aterramiento (m); LC = longitud de la cuña (m)

Tabla 4.8. Análisis de regresión múltiple para el volumen de sedimentos V_A (m^3)

Variable dependiente	Variables independientes	Ecuación	R ²
V_A (m^3)	SI (m^2) SV (m^2)	$V_A = 16,9463 + 0,002379745 \cdot SI + 0,00156094 \cdot SV$	0,8388
V_A (m^3)	SI (m^2) AA (m)	$V_A = -47,4996 + 0,00279774 \cdot SI + 31,2305 \cdot AA$	0,8694
V_A (m^3)	SI (m^2) LC (m)	$V_A = -46,2207 + 0,00220957 \cdot SI + 7,178728 \cdot LC$	0,8946
V_A (m^3)	AA (m) LC (m)	$V_A = -151,366 + 25,228 \cdot AA + 15,0248 \cdot LC$	0,7029
V_A (m^3)	SI (m^2) AA (m) LC (m)	$V_A = -77,018 + 0,00217415 \cdot SI + 20,4494 \cdot AA + 6,02492 \cdot LC$	0,9090
V_A (m^3)	SI (m^2) SV (m^2) AA (m) LC (m)	$V_A = -76,8629 + 0,00314238 \cdot SI + 0,00214797 \cdot SV + 20,2664 \cdot AA + 6,42272 \cdot LC$	0,9213

V_A = Volumen de la cuña de sedimentos (m^3); SI = Superficie individual de la cuenca de aportación (m^2); SV = Superficie cubierta de vegetación (m^2); AA = Altura del aterramiento (m); LC = longitud de la cuña (m)

El ajuste de regresión que relaciona el volumen de sedimentos (V , m^3) con la superficie individual de la cuenca de aportación (SI , m^2) ofrece buenos resultados. En concreto, de acuerdo con la Tabla 4.7, la ecuación de segundo grado es con la que mejor coeficiente de regresión se obtiene, por lo que es la que se aplica para calcular el volumen de la cuña de los diques forestales que no se han podido medir por aplicación del método propuesto:

$$V = 24,244 + 0,00128323 \cdot SI \cdot 3,49778 \cdot 10^{-9} \cdot SI^2$$

Donde V es el volumen de sedimentos (m^3) y SI es la superficie individual de la cuenca de aportación (m^2). En la Figura 4.6 se muestra gráficamente el ajuste realizado. Esta ecuación es de gran utilidad y aplicación a otras zonas similares a la de estudio: ubicada en una zona de clima mediterráneo-continental, con suelos de textura franco-



arenosa. En este estudio se ha empleado para estimar el volumen de sedimentos en los escasos diques que no se pudieron medir por aplicación directa de la metodología propuesta. Los datos de las dos variables empleadas en la ecuación de regresión para esos diques que no se han podido medir y los resultados de la aplicación de la ecuación se muestran en la Tabla 4.9. En esta tabla se observa que el dique 86 no posee volumen de sedimentos retenidos. El motivo es que, como se ha indicado anteriormente (apartado 3.10.3), se trata de un dique cementado con fines de almacenamiento de agua, y por tanto en él se realizan vaciados y limpiezas de sedimentos para que puedan cumplir su función, por lo que no posee cuña para su medición.

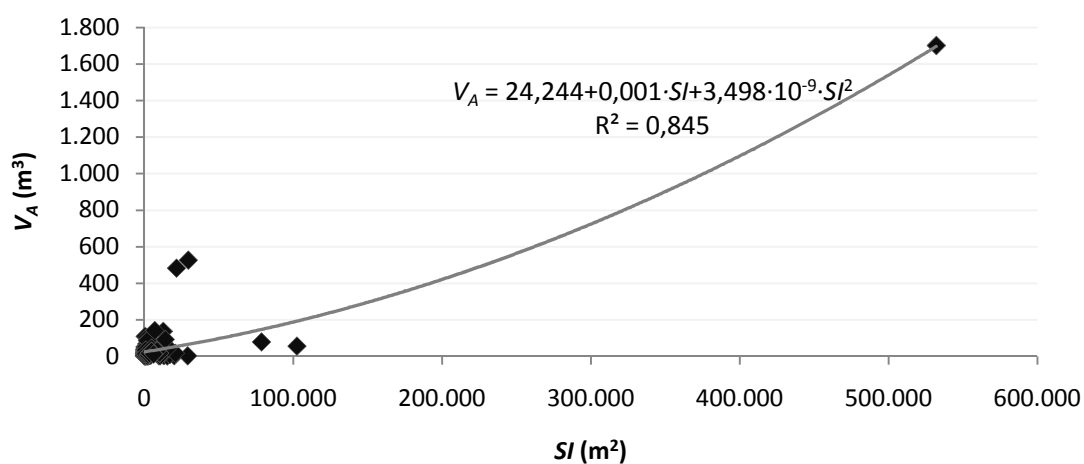


Figura 4.6. Ajuste de regresión entre la superficie de aportación individual (SI , m^2) y el volumen de sedimentos (V_A , m^3)

Tabla 4.9. Volumen (V_A , m^3) estimado por análisis de regresión simple a partir de la superficie de aportación individual (SI , m^2) para los diques no medidos por aplicación directa de la metodología

Dique	SI (m^2)	V_A (m^3)
26	18.698,38	60,47
31	17.772,59	58,10
53	710,23	25,17
58	1.214,86	25,85
60	19.953,00	63,77
73	97.308,18	480,31
77	2.870,75	28,22
86	780.968,09	-
101	18.921,44	61,05
115	1.373,65	26,07

Si bien el mejor ajuste se ha conseguido con la ecuación señalada, se aportan otras ecuaciones que permiten estimar el volumen de sedimentos a partir de una combinación de las variables anteriormente indicadas (Tabla 4.8). Se trata de ajustes



tan buenos que convierten a estas ecuaciones en una sencilla herramienta para determinar el volumen de sedimentos en otras zonas con características semejantes. Belmonte *et al.* (2005a, 2005b) también aportan una ecuación que relaciona el volumen de sedimentos (V , m^3) con la superficie de la cuenca de aportación (S , ha):

$$V(m^3) = 192,05 \cdot S^{0,623} \quad R^2 = 0,6505$$

El ajuste no es tan bueno como el conseguido en la zona de estudio, si bien se trata de una ecuación de fácil aplicación. No obstante, esta ecuación no puede emplearse en la zona de estudio, ya que las características ambientales son muy diferentes. Además, el resultado de su empleo para estimar el volumen en los diques que no se pudieron medir por aplicación de la metodología propuesta ofrece un resultado medio de $506,55 m^3$ de sedimentos por dique, es decir, 10 veces superior a la media obtenida en el resto de diques y por tanto muy superior a lo esperado; si se aplica a los diques medidos, el resultado medio es de $128,91 m^3$ de sedimentos por dique, es decir, 3 veces superior al obtenido de su medición en campo. No es común encontrar en la bibliografía ecuaciones tan simples que permitan determinar de forma fácil el volumen de sedimentos retenidos en los diques forestales, salvo las mencionadas anteriormente que asemejan la cuña a figuras geométricas, pero que sin embargo no tienen en cuenta la superficie de aportación de sedimentos al dique, parámetro que influye en gran medida y muestra una gran correlación con el volumen de la cuña de sedimentos de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio (Tabla 4.6), y de acuerdo con otros autores. Así, Romero *et al.* (2007a), Romero (2008) y Romero *et al.* (2012) también encuentran una correlación negativa entre la tasa de erosión ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) y la superficie de aportación ($R = -0,51$). Boix-Fayos *et al.* (2008) y Sougnez *et al.* (2011) también relacionan la erosión con el área de las subcuencas, obteniendo asimismo que la tasa de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) disminuye con el incremento del área de aportación. Por tanto, una correlación positiva entre el volumen de la cuña de sedimentos y el área de la cuenca de aportación se traduce en una relación negativa entre esta área y la tasa de erosión. La relación negativa significativa que encontramos entre el área de drenaje y la tasa de erosión ha sido puesta de manifiesto por diversos autores que desarrollan sus estudios en el sur de España (Martín-Rosales *et al.*, 2003; De Vente *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Boix-Fayos *et al.*, 2008; Bellín *et al.*, 2011). Esto sugiere, de acuerdo con Bellín *et al.* (2011), que un menor tamaño de la cuenca está probablemente relacionado con un menor volumen de cuña o deposición de sedimentos (Birkinshaw & Bathurst, 2006; Haregeweyn *et al.*, 2008). Esta afirmación se cumple en este trabajo: se observan mayores volúmenes de sedimentos en aquellos diques que poseen una mayor cuenca de aportación de sedimentos ($R^2 = 0,91$). La fuerte relación existente entre la superficie de aportación individual de sedimentos al dique y el volumen de sedimentos retenidos se verá reducida en aquellos sitios en los que la superficie de aportación se encuentre revegetada, o mejor dicho, desde el momento en que esta superficie se encuentre cubierta de vegetación, ya que la vegetación ayuda a frenar la erosión y a retener los sedimentos (Martínez *et al.*, 1991; Marston & Dolan, 1999; Chirino *et al.*, 2003; Bochet *et al.*, 2010; Molina *et al.*, 2009; González-Pelayo *et al.*, 2010; Remaitre & Malet, 2010; Shit *et al.*, 2013).



En la Tabla 4.10 se muestra el volumen de sedimentos de la totalidad de los diques de la restauración. Como resultado, entre todos los diques construidos se han retenido 6.194,95 m³ de sedimentos, por lo que el valor medio de retención de sedimentos es de 50,37 m³ por dique.

Tabla 4.10. Volumen de sedimentos retenidos por la totalidad de los diques (V_A , m³). En negrita los casos en los que el volumen se ha estimado por ecuación de regresión a partir de la superficie individual de su cuenca de aportación

Dique	V_A (m ³)	Dique	V_A (m ³)	Dique	V_A (m ³)	Dique	V_A (m ³)
1	4,07	32	77,42	63	135,92	94	13,14
2	2,18	33	33,99	64	5,98	95	34,08
3	2,39	34	11,10	65	2,82	96	15,81
4	54,69	35	16,77	66	1,84	97	9,38
5	45,59	36	15,84	67	1,63	98	45,49
6	15,68	37	4,73	68	9,41	99	28,12
7	3,21	38	1,05	69	40,70	100	29,31
8	5,10	39	48,69	70	5,17	101	61,05
9	3,04	40	11,68	71	7,95	102	525,85
10	1,17	41	21,28	72	24,14	103	1701,52
11	8,42	42	1,96	73	480,31	104	88,35
12	1,78	43	8,86	74	5,30	105	49,81
13	8,12	44	14,73	75	7,58	106	29,05
14	32,50	45	47,40	76	5,13	107	91,27
15	37,77	46	6,04	77	28,22	108	16,57
16	28,57	47	50,49	78	12,64	109	11,12
17	66,56	48	9,17	79	19,25	110	85,54
18	5,16	49	23,65	80	4,32	111	21,05
19	17,80	50	7,16	81	2,09	112	25,03
20	9,64	51	14,73	82	4,09	113	33,20
21	6,36	52	24,82	83	2,90	114	140,20
22	3,70	53	25,17	84	3,29	115	26,07
23	5,19	54	2,67	85	4,52	116	12,16
24	7,43	55	71,28	86	-	117	43,74
25	482,06	56	11,15	87	49,52	118	7,20
26	60,47	57	45,81	88	28,87	119	28,54
27	108,25	58	25,85	89	7,78	120	12,58
28	40,66	59	1,85	90	14,36	121	16,30
29	8,65	60	63,77	91	1,27	122	26,60
30	44,64	61	7,96	92	35,69	123	11,10
31	58,10	62	102,03	93	5,01	MEDIA	50,37

Los resultados que se obtienen en otras zonas de la geografía española son dispares, si bien los estudios se centran principalmente en el sureste peninsular. Una cuenca muy estudiada es la cuenca del río Quípar, un pequeño río, afluente del río Segura por su



margen derecha y localizado en la provincia de Murcia. El clima en esta región es semiárido, con inviernos suaves y veranos calurosos y secos, y la litología se compone de calizas y dolomías en la parte alta de la cuenca, y calizas, margas, yesos, arenas, areniscas y depósitos cuaternarios en la parte baja. Se trata de suelos con escasa cubierta vegetal y en sus barrancos se han construido 425 diques que evitan y reducen la colmatación del embalse Alfonso XII, localizado en la desembocadura del río, antes de la convergencia con el río Segura. Hernández-Laguna *et al.* (2004) estudiaron el volumen retenido en estos diques asemejando la cuña de sedimentos a una pirámide de base trapezoidal delimitada por la superficie de los sedimentos del dique y obtuvieron un volumen total de sedimentos (V) de 3.870,6 m³ en 7 diques, es decir, una media de 552,9 m³ de sedimentos retenidos por dique. Belmonte *et al.* (2005a), sin embargo, obtuvieron un valor medio de 1.212,99 m³ de sedimentos retenidos en cada dique en esta misma cuenca, y empleando la misma fórmula planteada por Hernández-Laguna *et al.* (2004). El valor asciende a 2.112,6 m³ de sedimentos acumulados de media en cada dique de la cuenca del Quípar siguiendo a Belmonte *et al.* (2005b), resultados obtenidos 41 años después de su construcción. Belmonte & Romero (2009) también se centraron en el estudio de la cuenca del río Quípar, y asimismo, emplean la fórmula propuesta por Hernández-Laguna *et al.* (2004), sin embargo obtienen una media de 121,30 m³ de sedimentos retenidos por dique, gracias al muestreo de 57 diques tras 41 años desde su construcción. Es decir, son varios los autores y estudios realizados en esta cuenca que tratan de estimar el volumen de sedimentos acumulados en estos diques empleando el mismo método, pero sin embargo son muy dispares los resultados obtenidos, a pesar de centrarse en áreas comunes, con una media de sedimentos acumulados por dique que varía de 121,30 m³ a 2.112,6 m³. Esto puede deberse a la poca exactitud del método empleado o a las diferencias de tamaño de los diques existentes, en las cubiertas vegetales y en las texturas de los suelos. Todos estos valores son superiores a los obtenidos en este trabajo, debido probablemente a las altas tasas de erosión que sufre el sureste español, con un clima más árido y erosivo que el de la zona de estudio.

Otros autores se han centrado en el estudio de otras cuencas localizadas también en la provincia de Murcia, una de las provincias españolas que más sufre los procesos erosivos. Así, Castillo *et al.* (2007) calculan el volumen asemejando la cuña de sedimentos a un canal prismático de sección rectangular, y obtienen valores de 3.218 m³ retenidos de media por dique, en mediciones de 29 diques tras aproximadamente 40 años de su construcción en la cuenca El Cárcavo, cuya litología se compone de calizas, margas y depósitos cuaternarios. Sougnez *et al.* (2011) analizan las tasas de erosión a través de la medición del volumen de sedimentos acumulados en 22 diques situados en la Sierra de la Torrecilla y en la Sierra de Carrascoy, donde predominan los esquistos, los conglomerados y más localmente areniscas y calizas, y obtienen valores de 232,76 m³ por cada estructura de retención, medidos en torno a 22 años después de su construcción. Su metodología para calcular el volumen de sedimentos también combina mediciones topográficas con cálculos analíticos, pero la morfología de la cárcava previa a la construcción del dique la asemejan a una estructura piramidal con una base trapezoidal. Esta misma semejanza es utilizada en los estudios realizados en la cuenca del Quípar y en el estudio de Romero *et al.* (2007a), cuya metodología es



aplicada en este trabajo (metodología C) para su comparación con la metodología propuesta (metodología A). Estos valores siguen siendo muy superiores a los obtenidos en la restauración de Tórtoles, desde más del doble hasta 62 veces más.

Bussi *et al.* (2013) desarrollan su estudio en otra zona de la Península Ibérica, en concreto en la Rambla del Poyo, al oeste de Valencia. Se trata de un clima igualmente semiárido, y los suelos son de textura franco-limosa a franco-arcillosa, e incluso franco-arenosa. El valor que obtienen es de 1.434 m³ de sedimentos retenidos por el único dique medido.

Ramos *et al.* (2013) aplican la metodología propuesta en este trabajo (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b) en la cuenca del río Carrión, en concreto en una zona de cárcavas ubicada en Saldaña (Palencia), en el centro de España, que posee un clima muy similar a la zona de estudio, mediterráneo continental, que posee suelos ricos en arcillas y de baja capacidad de retención de agua. Sus resultados, obtenidos de la medición de 5 diques, ofrecen un valor medio de 137,92 m³ de sedimentos por dique. Ramos (2014) realiza la medición de 25 diques ubicados en la misma zona y obtiene un volumen medio de 144,35 m³ de sedimentos por dique.

Fuera de España también se han desarrollado estudios similares. En la cuenca Chehel Cheshme, en la provincia de Fars en Irán, que posee un clima muy húmedo y una topografía montañosa, Solaimani *et al.* (2008) obtienen una media de 118,17 m³ por dique gracias a la medición del volumen de 24 diques, basándose en un canal con sección rectangular y usando la ecuación propuesta por Lien (2003) y May & Gresswell (2003).

En China, Zhang *et al.* (2010) obtienen valores de 16.590.600 m³ de sedimentos retenidos en los diques de la cuenca de Chabagou, donde localizan 484 diques. Esto supone una media de 34.278,10 m³ retenidos por dique, si bien basan sus cálculos en modelos digitales del terreno. En esta región el clima es continental seco, y sus suelos son de textura limosa. Por su parte, Wang *et al.* (2014) centran su estudio en la cuenca Yangjuangou, en la meseta de Loess, igualmente en China. El clima es semiárido continental y los suelos con texturas que van desde limo fino a limo, vulnerables a la erosión. Obtienen una media de 764,93 m³ de sedimentos retenidos en cada dique gracias a la medición de 27 diques. En la misma región (meseta de Loess) Xu *et al.* (2002, 2004) ofrecen valores de sedimentos retenidos tras diques de arena, con resultados de 7.127,32 Mm³ de sedimentos retenidos entre 1952 y 1995. El clima, que es un factor esencial para el control de la sedimentación y erosión aluvial (Tilman, 2000), es en su zona de estudio principalmente árido y semiárido seco, y los suelos tienen una textura franco-areno-limosa, de estructura suelta.

En Malasia, en la cuenca Ulu Kinta, los valores medios alcanzan los 2.054 m³ por dique, si bien se trata de mediciones en 3 diques únicamente (Abedini *et al.*, 2012). Para la determinación de este volumen asumen que el cauce tiene forma de U y que los sedimentos atrapados forman un canal prismático, y el volumen es calculado asumiendo una forma rectangular, basándose en Lien (2003) y May & Gresswell



(2003). Se trata de suelos arcillo-limosos o limo-arcillosos, y el clima es tropical, cálido y húmedo.

En resumen todos los valores que se observan en otros estudios son bastante superiores a los obtenidos en la restauración de Tórtoles por aplicación de la metodología propuesta (Tabla 4.11). Se trata de estudios desarrollados en zonas áridas y semiáridas, con climas extremos y con texturas más finas que las encontradas en el área de Tórtoles. Por ello, no es de extrañar que no se obtengan valores semejantes. No obstante, cabría esperar valores similares en zonas afines y aplicando metodologías equivalentes, pero este patrón tampoco se cumple. Además, las metodologías que se aplican son demasiado simplistas, no ajustándose fielmente a la realidad de la cuña de deposición, por lo que existe una falta de exactitud en el resultado. Es por ello, que las conclusiones obtenidas sobre la eficacia de los diques forestales son diversas y obligan un estudio más detallado y de mayor exactitud del volumen de la cuña de sedimentación. Por último, hay que tener en cuenta que el volumen retenido por los diques depende de múltiples factores, por lo que los volúmenes de estudios diversos no son fácilmente comparables. Por ejemplo, entre estos factores se encuentran las dimensiones de los diques, por lo que no es fácil comparar los resultados de volumen salvo que se refieran a m^3 de sedimentos por m de altura o longitud del dique.

Tabla 4.11. Resumen de valores medios de volumen de sedimentos (V, m^3) obtenidos por diversos autores

Localización	$V (m^3)$	Referencia bibliográfica
Cuenca del río Quípar (Murcia)	552,94	Hernández-Laguna <i>et al.</i> (2004)
Cuenca del río Quípar (Murcia)	1.212,99	Belmonte <i>et al.</i> (2005a)
Cuenca del río Quípar (Murcia)	2.112,60	Belmonte <i>et al.</i> (2005b)
Cuenca del río Quípar (Murcia)	121,30	Belmonte & Romero (2009)
Cuenca El Cárcavo (Murcia)	3.218,00	Castillo <i>et al.</i> (2007)
Sierra de la Torrecilla (Murcia)	129,03	Sougnez <i>et al.</i> (2011)
Sierra de Carrascoy (Murcia)	388,38	Sougnez <i>et al.</i> (2011)
Rambla del Poyo (Valencia)	1.434,00	Bussi <i>et al.</i> (2013)
Cuenca del río Carrión (Palencia)	137,92	Ramos <i>et al.</i> (2013)
Cuenca del río Carrión (Palencia)	144,35	Ramos (2014)
Cuenca Chehel Cheshme (Irán)	118,17	Solaimani <i>et al.</i> (2008)
Cuenca de Chabagou (China)	34.278,10	Zhang <i>et al.</i> (2010)
Cuenca Yangjuangou (China)	764,93	Wang <i>et al.</i> (2014)
Cuenca Ulu Kinta (Malasia)	2.054,00	Abedini <i>et al.</i> (2012)
Cuenca del río Corneja (Ávila)	50,37	Este trabajo



Por último, el análisis del volumen retenido se puede realizar teniendo en cuenta la totalidad de los diques que retienen sedimentos en una misma cárcava. De esta forma, Belmonte & Romero (2009) y Belmonte *et al.* (2005a) encuentran una relación entre el número de diques existentes en cada cárcava y el volumen total retenido entre esos diques, obteniendo la siguiente ecuación de regresión ($R^2 = 0,9591$):

$$V = 3.162,2 \cdot n - 9.971,4$$

Donde n es el número de diques construidos en cada cárcava y V (m^3) el volumen total retenido por los diques.

En el caso de estudio, se han encontrado 13 cárcavas, considerando en cada una aquéllas que vierten sobre otra y por tanto se encuentran relacionadas. En la Tabla 4.12 se muestran las cárcavas, el número de diques construidos en cada cárcava y el volumen total retenido por los diques indicados. La relación entre el número de diques construidos en cada cárcava y el volumen total retenido por ellos se muestra en la Figura 4.7. La ecuación de regresión que relaciona ambas variables es la siguiente, con un coeficiente de regresión similar al obtenido por Belmonte & Romero (2009) y Belmonte *et al.* (2005a) ($R^2 = 0,9511$):

$$V = 56,708n - 60,006$$

Donde n es el número de diques construidos en cada cárcava y V (m^3) el volumen total retenido por los diques.

Tabla 4.12. Cárcavas, número de diques por cárcava (n) y volumen retenido (V , m^3)

Cárcava	n	V (m^3)
1	3	8,64
2	21	367,46
3	1	482,06
4	78	4.561,33
5	4	258,48
6	3	113,23
7	2	46,08
8	2	173,40
9	3	81,97
10	3	48,31
11	1	16,30
12	1	26,60
13	1	11,10

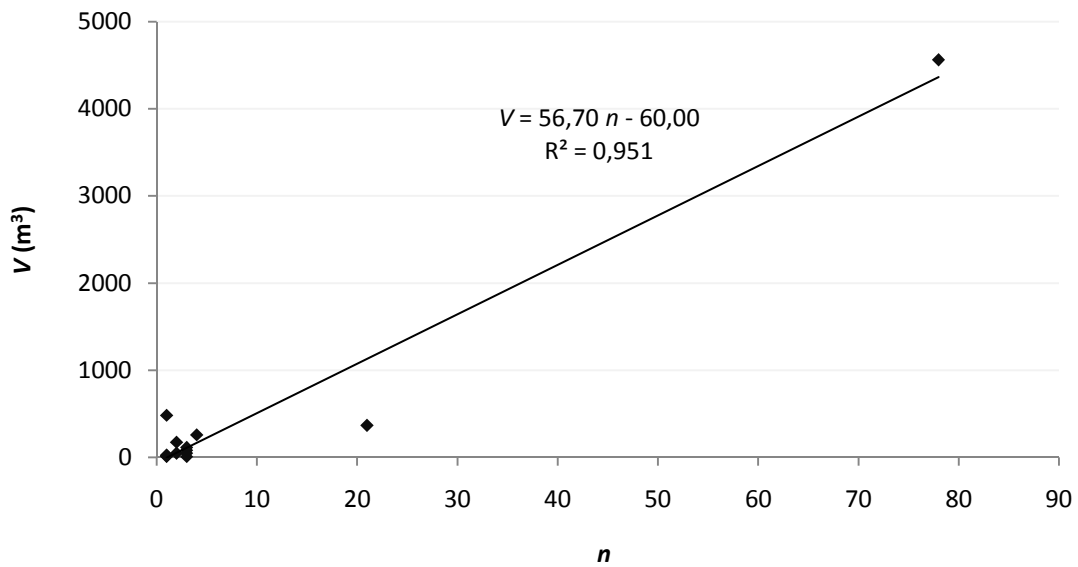


Figura 4.7. Relación entre el número de diques por cárcava (n) y el volumen de sedimentos (V , m^3)

4.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN CON OTRAS METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS COMPARATIVO

Se ha realizado una comparación entre las metodologías aplicadas para determinar el volumen de la cuña de sedimentación, por un lado en cuanto a los resultados obtenidos de la estimación del volumen con cada una de ellas y por otro lado en cuanto al tiempo empleado en aplicarlas.

4.2.1. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS EN CUANTO A LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN

Como ya se ha expuesto anteriormente, existen varias metodologías que estiman el volumen de sedimentos retenidos en los diques forestales (Lien, 2003; May & Gresswell, 2003; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Boix-Fayos *et al.*, 2008). En concreto, las metodologías propuestas por Castillo *et al.* (2007), que se denomina para este trabajo metodología B, y por Romero *et al.* (2007a), denominada metodología C, son propuestas que estiman el volumen asemejando la cuña de sedimentos a un cuerpo geométrico, de forma que existe semejanza con la metodología propuesta por Díaz (2011a; 2011b) y Díaz *et al.* (2014a, 2014b) (metodología A), y por tanto la comparación se considera viable. Los resultados de la aplicación de la metodología B se muestran en la Tabla 4.13, y los parámetros resultantes de su análisis estadístico se indican en la Tabla 4.14. El volumen medio de sedimentos retenidos es de $38,08 m^3$ por dique (V_B), y el total de sedimentos en los 113 diques analizados es de $4.303,04 m^3$.

Tabla 4.13. Volumen de los diques de la restauración obtenido de la aplicación de la metodología de Castillo *et al.* (2007) (V_B , m³)

Dique	V_B (m ³)	Dique	V_B (m ³)	Dique	V_B (m ³)	Dique	V_B (m ³)
1	2,83	32	169,72	63	68,70	94	6,57
2	1,26	33	25,81	64	2,12	95	28,48
3	2,01	34	9,48	65	1,17	96	8,25
4	44,09	35	7,50	66	4,05	97	14,19
5	35,43	36	12,32	67	1,48	98	93,33
6	11,45	37	5,25	68	8,05	99	40,04
7	3,98	38	0,63	69	18,92	100	32,79
8	2,86	39	54,96	70	4,48	102	376,15
9	2,05	40	7,51	71	6,53	103	1.179,25
10	1,24	41	19,77	72	13,23	104	78,77
11	6,30	42	1,41	74	3,28	105	40,16
12	1,97	43	7,57	75	6,17	106	26,11
13	8,31	44	13,45	76	3,32	107	72,94
14	33,33	45	52,10	78	7,22	108	11,80
15	29,40	46	6,37	79	14,62	109	8,00
16	17,03	47	32,33	80	3,86	110	86,98
17	23,75	48	8,20	81	2,00	111	22,52
18	4,23	49	18,16	82	2,49	112	28,83
19	18,74	50	4,44	83	2,64	113	18,98
20	10,20	51	13,45	84	1,71	114	79,23
21	2,39	52	26,86	85	2,99	116	7,80
22	2,44	54	2,40	87	30,15	117	42,73
23	3,43	55	26,82	88	18,57	118	7,18
24	5,41	56	6,09	89	4,81	119	21,58
25	435,21	57	36,82	90	13,45	120	10,09
27	125,45	59	1,39	91	0,63	121	23,50
28	40,51	61	7,00	92	29,94	122	29,51
29	11,25	62	97,20	93	11,83	123	9,54
30	47,77						

Tabla 4.14. Estadística descriptiva del volumen de sedimentos V_B (m³)

	V_B (m ³)
Media aritmética	38,08
Mediana	11,25
Desviación típica	122,80
Varianza	15.079,62
Coefficiente de Variación (%)	322,48
Mínimo	0,63
Máximo	1.179,25
Rango	1.178,63
Sesgo Estandarizado	33,84
Curtosis	68,76
Curtosis Estandarizada	149,21
Intervalo de confianza para la media	15,19 - 60,97
Intervalo de confianza para la desviación típica	108,61 - 141,29



Los resultados de la aplicación de la metodología C se muestran en la Tabla 4.15, y los parámetros resultantes de su análisis estadístico se indican en la Tabla 4.16. El volumen medio de sedimentos retenidos por dique es de $42,19 \text{ m}^3$ (V_B), y el total de sedimentos en los 113 diques analizados es de $4.767,70 \text{ m}^3$.

Tabla 4.15. Volumen de los diques de la restauración obtenido de la aplicación de la metodología de Romero *et al.* (2007a) (V_C , m^3)

Dique	V_C (m^3)	Dique	V_C (m^3)	Dique	V_C (m^3)	Dique	V_C (m^3)
1	4,55	32	251,56	63	86,14	94	8,63
2	2,56	33	27,23	64	2,73	95	25,95
3	2,57	34	5,52	65	1,20	96	8,58
4	54,87	35	7,55	66	2,97	97	12,17
5	30,90	36	14,41	67	1,36	98	114,28
6	10,71	37	7,05	68	5,53	99	18,48
7	2,84	38	1,07	69	13,76	100	25,88
8	2,57	39	39,46	70	6,03	102	117,59
9	2,61	40	12,75	71	6,00	103	1688,86
10	1,31	41	20,81	72	14,39	104	55,90
11	8,00	42	1,66	74	5,79	105	58,84
12	2,10	43	9,53	75	6,78	106	24,10
13	8,31	44	12,21	76	2,81	107	81,04
14	17,30	45	43,83	78	5,64	108	9,25
15	26,90	46	15,77	79	14,05	109	8,00
16	29,87	47	34,11	80	3,13	110	57,98
17	29,56	48	7,02	81	1,78	111	16,93
18	3,19	49	24,34	82	3,32	112	33,63
19	21,26	50	5,57	83	2,60	113	24,27
20	9,98	51	12,21	84	2,24	114	97,30
21	2,45	52	22,36	85	5,55	116	13,13
22	2,27	54	2,98	87	24,68	117	31,32
23	4,22	55	55,70	88	24,92	118	7,45
24	4,51	56	6,21	89	6,18	119	23,18
25	455,36	57	41,51	90	10,93	120	13,45
27	181,16	59	1,07	91	1,07	121	15,99
28	19,63	61	7,17	92	30,67	122	20,60
29	14,33	62	133,00	93	17,28	123	10,90
30	54,86						

Los valores obtenidos con la metodología A son mayores que con el resto de metodologías. En concreto, el volumen medio de sedimentos retenidos en los diques de Tórtoles es un 19,81% superior con la metodología A que con la metodología B, y un 11,15% superior con la metodología A que con la metodología C. La metodología B es la que posee inferior valor mínimo, y la metodología A posee el mayor máximo, si bien el rango es mayor en esta metodología ($1.700,47 \text{ m}^3$), aunque tan sólo $12,68 \text{ m}^3$ mayor



en la metodología C, y 521,84 m³ mayor en la metodología B, por lo que de forma general se observan mayores diferencias entre la metodología B y las dos restantes (Figura 4.8).

Para realizar una comparación estadística de los datos de volumen obtenidos con las tres metodologías (V_A , V_B y V_C) se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) cuya tabla de resultados se muestra en la Tabla 4.17. Esta tabla descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en el caso del volumen es igual a 0,1048, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el P-valor es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los volúmenes con las tres metodologías, con un nivel del 95,0% de confianza. Por otra parte, tal y como se observa en la Figura 4.8, puede afirmarse que los intervalos de confianza son tan amplios que, la media real (desconocida) de cada método, podría ser igual o muy parecida. Si no existiese solape entre los intervalos de confianza, entonces, las diferencias serían significativas, porque entonces nunca podría coincidir la media real de cada método.

La Tabla 4.18 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La parte inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Según se puede observar no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 4.16. Estadística descriptiva del volumen de sedimentos V_C (m³), obtenido de la aplicación de la metodología de Romero *et al.* (2007a)

	V_C (m ³)
Media aritmética	42,19
Mediana	12,21
Desviación típica	165,50
Varianza	27.391,55
Coefficiente de Variación (%)	19,41
Mínimo	1,07
Máximo	1.688,86
Rango	1.687,79
Sesgo Estandarizado	39,55
Curtosis	89,62
Curtosis Estandarizada	194,47
Intervalo de confianza para la media	11,34 – 73,04
Intervalo de confianza para la desviación típica	146,38 – 190,43

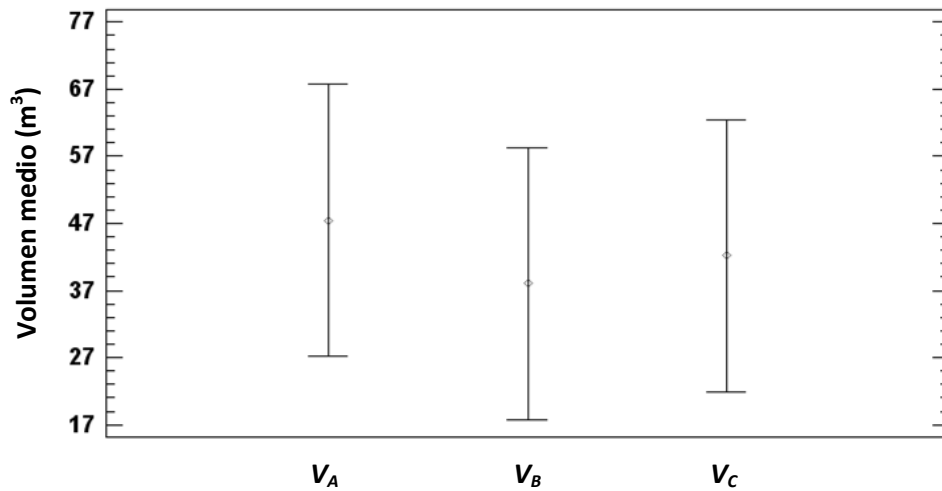


Figura 4.8. Comparación del volumen medio de la cuña de sedimentos retenida en los diques forestales de Tórtoles por aplicación de las metodologías A, B y C (V_A , V_B y V_C , m^3), e intervalo LSD de Fisher (95,0% de confianza)

Tabla 4.17. Tabla ANOVA para el análisis del volumen (V_A)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	5.025,16	2	2.512,58	0,1048	0,9005
Intra grupos	$8,0558 \cdot 10^6$	336	23.975,6		
Total (Corr.)	$8,0608 \cdot 10^6$	338			

Tabla 4.18. Prueba de rangos múltiples para el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , V_B y V_C , m^3)

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media aritmética	Grupos Homogéneos
V _B	113	38,08	X
V _C	113	42,19	X
V _A	113	47,49	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
V _A - V _B	-	9,4061	40,5207
V _A - V _C	-	5,2941	40,5207
V _B - V _C	-	-4,1120	40,5207

No obstante, dado que las muestras no siguen normalidad, no es adecuado trabajar con medias, sino que es aconsejable hacerlo con medianas o desviaciones típicas. Por ello se aplica la prueba de Levene (Tabla 4.19), que evalúa la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de las tres columnas son iguales. Puesto que el P-valor es mayor que 0,05 no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con el 95,0% de confianza. Sin embargo, comparando las desviaciones típicas para cada par de muestras, el resultado indica que existen diferencias significativas entre la desviación típica de la metodología B y las de las metodologías A y C, al 95,0% de significación.



Tabla 4.19. Verificación de varianza (prueba de Levene) para el volumen de la cuña de sedimentos (V_A , V_B y V_C , m^3)

		Prueba	P-valor
		0,1596	0,8526

Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-Valor
V_A/V_B	171,627	122,799	1,95335	0,0005
V_A/V_C	171,627	165,504	1,07536	0,7013
V_B/V_C	122,799	165,504	0,550521	0,0018

Aplicando el test de Kruskal-Wallis se evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las tres columnas es la misma. Puesto que el P-valor (Tabla 4.20) es mayor que 0,05 no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.20. Prueba de Kruskal-Wallis para el volumen de la cuña (V_A , V_B y V_C , m^3)

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
V_A	113	180,26
V_B	113	163,76
V_C	113	165,98

Estadístico = 1,8855 P-valor = 0,3896

Es importante indicar que las muestras no siguen normalidad y que por tanto lo conveniente es realizar un cambio de variable. Sin embargo, si bien el cambio de variable a su función logarítmica consigue normalidad en las muestras, los resultados del análisis de la varianza no discrepan con los aquí descritos (P-valor=0,4155) al igual que la prueba de múltiples rangos, la prueba de Levene (P-valor= 0,8502), la prueba de Kruskal-Wallis (P-valor = 0,3896) y la prueba de la mediana de Mood (P-valor = 0,6311). Es decir, en todos los casos los análisis estadísticos indican que no existen diferencias significativas entre las muestras. Esta circunstancia se da con el resto de variables que no siguen normalidad, por lo que se ha decidido trabajar en todo caso con los datos originales. No obstante, los análisis tanto de la normalidad como de comparación de muestras con el cambio de variable se pueden consultar en el Anexo III.

A pesar de estos resultados, hay que tener en cuenta que las metodologías B y C se aplican aquí a partir de las mediciones de detalle realizadas para la aplicación de la metodología A. Este motivo podría explicar que los resultados que se obtienen por la aplicación de las metodologías B y C sean cercanos a los obtenidos con la metodología propuesta (A), ya que es de suponer que se está realizando una mejora de las metodologías propuestas para la comparación. Por un lado, el instrumento utilizado puede influir bastante en los resultados, no teniendo la misma exactitud una cinta métrica o un GPS no centimétrico que una estación total, con lo que habría una distorsión en los datos de partida para el cálculo del volumen. La medición de la cuña de sedimentos requiere gran exactitud, no permite errores del orden de metros, ya que el resultado no sería válido. Las versiones menos precisas de GPS producen, por



tanto, graves errores que no pueden ser asumidos en un estudio de estas características. Así lo indica Amado (1997) al afirmar que la localización del punto obtenido con GPS puede variar dentro de un diámetro de 100 m con los dispositivos menos precisos. Es importante señalar, además, que en lugares con cubierta vegetal como el de estudio o bosques espesos no es posible la recepción de las señales emitidas por los satélites (Amado, 1997). No obstante, en la actualidad, existen GPS submétricos, con una precisión centimétrica y con antenas de mayor potencia, que ofrecen resultados similares a los obtenidos mediante el uso de la estación total. Y por otro lado, a mayor número de secciones transversales medidas en campo mayor será la precisión de los datos de origen por lo que el trabajo de detalle realizado podría mejorar los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías propuestas por otros autores.

Además, hay que tener en cuenta que en las fórmulas que plantean Castillo *et al.* (2007) y Romero *et al.* (2007a) son las correspondientes a figuras geométricas. En estas figuras, de acuerdo con los autores, la altura se correspondería con la longitud de la cuña de sedimentos. Sin embargo, esto es geométrica y matemáticamente incorrecto, ya que en el cálculo del volumen de un prisma, un cono o una pirámide inclinada, la altura (h) empleada en la fórmula es siempre la altura vertical, y no la longitud de una de las caras del cuerpo geométrico. Los autores, en la aplicación del método, hacen coincidir la altura del cuerpo geométrico con la longitud de la cuña, pero este elemento que no posee pendiente cero, sino que se encuentra inclinada. Esto significa que los autores deberían haber proyectado la longitud de la cuña sobre el plano horizontal, y los volúmenes que ellos obtienen arrastran este error, que asumen al considerar esa semejanza entre la figura geométrica y la cuña de sedimentos. En el caso de la metodología propuesta (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b), las secciones que se obtienen para el cálculo del volumen son secciones paralelas, a una distancia constante y reducida, por lo que el pequeño error es asumible dada la proximidad entre secciones y las bajas pendientes que poseen las cuñas. El error de usar la distancia entre secciones medida sobre la cuña, respecto a la proyectada horizontal (que es la correcta) viene a ser de menos de un centímetro por metro con un ángulo de pendiente de 6°.

Por otro lado, la fórmula propuesta por Castillo *et al.* (2007) para el cálculo del volumen no es válida para todos los diques y cuñas de sedimentos, sino para aquellas en forma de prisma cuadrangular (tipo rambla, sección transversal en U), mientras que para cuencas con sección transversal en V, la fórmula sería:

$$V = \frac{1}{6} \cdot (w_s \cdot h \cdot l_s)$$

Siendo V el volumen de la cuña de sedimentos (m^3); w_s la anchura media de la cuña (m); h la altura de sedimentos desde la base del dique (m); y l_s la longitud de la superficie de sedimentación (m).



En otras situaciones que no se correspondan con estas opciones, secciones que no posean completamente forma de V, o no a lo largo de toda la cárcava, con varias cárcavas que confluyan en un mismo dique (cuña con dos colas o bifurcaciones) u otras circunstancias, estos ajustes propuestos tanto por la metodología B como por la metodología C no son válidos y por tanto los resultados diferirán en mayor medida con respecto de la realidad que la metodología A, que realiza un ajuste lo más cercano y exacto posible.

Analizando las diferencias entre las metodologías, dato a dato, en algunos casos las mediciones son mayores y en otro casos menores (Tabla 4.21). El valor medio de diferencia es de 9,41 m³ entre V_A y V_B , y 5,29 m³ entre V_A y V_C , pero considerando los datos brutos, de forma que los negativos compensan con los positivos. En valor absoluto, el valor medio de diferencia es de 13,29 m³ entre V_A y V_B , y 12,60 m³ entre V_A y V_C , y llega a alcanzar los 522,26 m³ entre V_A y V_B , y los 408,25 m³ de sedimentos entre V_A y V_C (Tabla 4.22). De nuevo se observa una mayor discrepancia con respecto a la metodología B. La suma de diferencias, en este caso, alcanza los 1.502,31 m³.

Tabla 4.21. Diferencias entre los volúmenes obtenidos con la metodología propuesta (V_A , m³) y los obtenidos por aplicación de las metodologías B y C (V_B y V_C , m³), en valor real y valor absoluto

Dique	$V_A - V_B$ (m ³)	$V_A - V_C$ (m ³)	$ V_A - V_B $ (m ³)	$ V_A - V_C $ (m ³)	Dique	$V_A - V_B$ (m ³)	$V_A - V_C$ (m ³)	$ V_A - V_B $ (m ³)	$ V_A - V_C $ (m ³)
1	1,24	-0,48	1,24	0,48	63	67,23	49,78	67,23	49,78
2	0,93	-0,37	0,93	0,37	64	3,87	3,25	3,87	3,25
3	0,38	-0,18	0,38	0,18	65	1,65	1,62	1,65	1,62
4	10,60	-0,18	10,60	0,18	66	-2,21	-1,13	2,21	1,13
5	10,16	14,69	10,16	14,69	67	0,15	0,27	0,15	0,27
6	4,23	4,96	4,23	4,96	68	1,36	3,87	1,36	3,87
7	-0,77	0,37	0,77	0,37	69	21,78	26,94	21,78	26,94
8	2,24	2,52	2,24	2,52	70	0,69	-0,86	0,69	0,86
9	0,98	0,43	0,98	0,43	71	1,43	1,95	1,43	1,95
10	-0,08	-0,14	0,08	0,14	72	10,90	9,75	10,90	9,75
11	2,12	0,42	2,12	0,42	74	2,02	-0,49	2,02	0,49
12	-0,19	-0,32	0,19	0,32	75	1,40	0,80	1,40	0,80
13	-0,19	-0,19	0,19	0,19	76	1,81	2,32	1,81	2,32
14	-0,84	15,20	0,84	15,20	78	5,42	7,00	5,42	7,00
15	8,38	10,88	8,38	10,88	79	4,63	5,19	4,63	5,19
16	11,55	-1,30	11,55	1,30	80	0,46	1,19	0,46	1,19
17	42,80	36,99	42,80	36,99	81	0,09	0,31	0,09	0,31
18	0,93	1,98	0,93	1,98	82	1,60	0,77	1,60	0,77
19	-0,94	-3,46	0,94	3,46	83	0,26	0,30	0,26	0,30
20	-0,56	-0,33	0,56	0,33	84	1,57	1,05	1,57	1,05
21	3,97	3,91	3,97	3,91	85	1,52	-1,04	1,52	1,04
22	1,26	1,43	1,26	1,43	87	19,37	24,84	19,37	24,84
23	1,75	0,96	1,75	0,96	88	10,30	3,95	10,30	3,95

Tabla 4.21. Diferencias entre los volúmenes obtenidos con la metodología propuesta (V_A , m^3) y los obtenidos por aplicación de las metodologías B y C (V_B y V_C , m^3), en valor real y valor absoluto (continuación)

Dique	$V_A - V_B$ (m^3)	$V_A - V_C$ (m^3)	$ V_A - V_B $ (m^3)	$ V_A - V_C $ (m^3)	Dique	$V_A - V_B$ (m^3)	$V_A - V_C$ (m^3)	$ V_A - V_B $ (m^3)	$ V_A - V_C $ (m^3)
24	2,02	2,92	2,02	2,92	89	2,97	1,61	2,97	1,61
25	46,84	26,69	46,84	26,69	90	0,91	3,43	0,91	3,43
27	-17,20	-72,91	17,20	72,91	91	0,65	0,20	0,65	0,20
28	0,15	21,03	0,15	21,03	92	5,75	5,02	5,75	5,02
29	-2,60	-5,68	2,60	5,68	93	3,17	-2,28	3,17	2,28
30	-3,13	-10,22	3,13	10,22	94	6,57	4,51	6,57	4,51
32	-92,30	-174,14	92,30	174,14	95	5,60	8,13	5,60	8,13
33	8,18	6,76	8,18	6,76	96	7,56	7,24	7,56	7,24
34	1,62	5,58	1,62	5,58	97	-4,81	-2,78	4,81	2,78
35	9,28	9,22	9,28	9,22	98	-47,84	-68,79	47,84	68,79
36	3,52	1,43	3,52	1,43	99	-11,92	9,64	11,92	9,64
37	-0,52	-2,32	0,52	2,32	100	-3,47	3,43	3,47	3,43
38	0,42	-0,03	0,42	0,03	102	149,69	408,25	149,69	408,25
39	-6,27	9,23	6,27	9,23	103	522,26	12,66	522,26	12,66
40	4,17	-1,07	4,17	1,07	104	9,58	32,45	9,58	32,45
41	1,51	0,47	1,51	0,47	105	9,65	-9,03	9,65	9,03
42	0,54	0,29	0,54	0,29	106	2,94	4,95	2,94	4,95
43	1,30	-0,67	1,30	0,67	107	18,33	10,23	18,33	10,23
44	1,28	2,53	1,28	2,53	108	4,77	7,31	4,77	7,31
45	-4,70	3,57	4,70	3,57	109	3,12	3,12	3,12	3,12
46	-0,33	-9,73	0,33	9,73	110	-1,43	27,56	1,43	27,56
47	18,17	16,38	18,17	16,38	111	-1,47	4,12	1,47	4,12
48	0,97	2,14	0,97	2,14	112	-3,80	-8,60	3,80	8,60
49	5,48	-0,69	5,48	0,69	113	14,22	8,93	14,22	8,93
50	2,72	1,59	2,72	1,59	114	60,96	42,89	60,96	42,89
51	1,28	2,53	1,28	2,53	116	4,35	-0,97	4,35	0,97
52	-2,05	2,46	2,05	2,46	117	1,01	12,42	1,01	12,42
54	0,27	-0,32	0,27	0,32	118	0,02	-0,26	0,02	0,26
55	44,46	15,58	44,46	15,58	119	6,96	5,35	6,96	5,35
56	5,06	4,95	5,06	4,95	120	2,49	-0,87	2,49	0,87
57	8,99	4,30	8,99	4,30	121	-7,20	0,31	7,20	0,31
59	0,46	0,78	0,46	0,78	122	-2,91	6,01	2,91	6,01
61	0,96	0,79	0,96	0,79	123	1,56	0,20	1,56	0,20
62	4,83	-30,97	4,83	30,97	MEDIA	9,41	5,29	13,29	12,60

Tabla 4.22. Resumen estadístico de las diferencias entre el volumen de sedimentos obtenido con la metodología propuesta (V_A , m^3) y el obtenido por aplicación de las metodologías B y C (V_B y V_C , m^3)

	$V_A - V_B$ (m^3)	$V_A - V_C$ (m^3)	$ V_A - V_B $ (m^3)	$ V_A - V_C $ (m^3)
Media aritmética	9,41	5,29	13,29	12,60
Mediana	1,56	1,62	2,72	3,12
Desviación típica	52,67	44,11	52,12	42,59
Varianza	2805,51	1945,61	2.716,44	1.813,69
Coefficiente de Variación (%)	563,11	833,17	392,92	337,98
Mínimo	-92,30	-174,14	0,02	0,03
Máximo	522,26	408,25	522,26	408,25
Rango	614,57	582,40	522,25	408,22
Sesgo Estandarizado	36,31	27,09	37,66	33,99
Curtosis	80,35	65,30	83,10	69,12
Curtosis Estandarizada	174,35	141,70	180,32	149,99
Total	1062,89	598,23	1.502,31	1.423,88

Por otro lado, se ha realizado un análisis de regresión para estudiar la relación entre el volumen de sedimentos retenido obtenido por la aplicación de las tres metodologías presentadas (V_A , V_B y V_C , m^3) y la superficie individual de la cuenca de aportación (SI , m^2), y se han obtenido buenos ajustes lineales con las tres metodologías (Figura 4.9), especialmente con la metodología propuesta por Romero *et al.* (2007a) (para $V_A - SI$, $R^2 = 0,8321$; para $V_B - SI$, $R^2 = 0,7998$; para $V_C - SI$, $R^2 = 0,8936$).

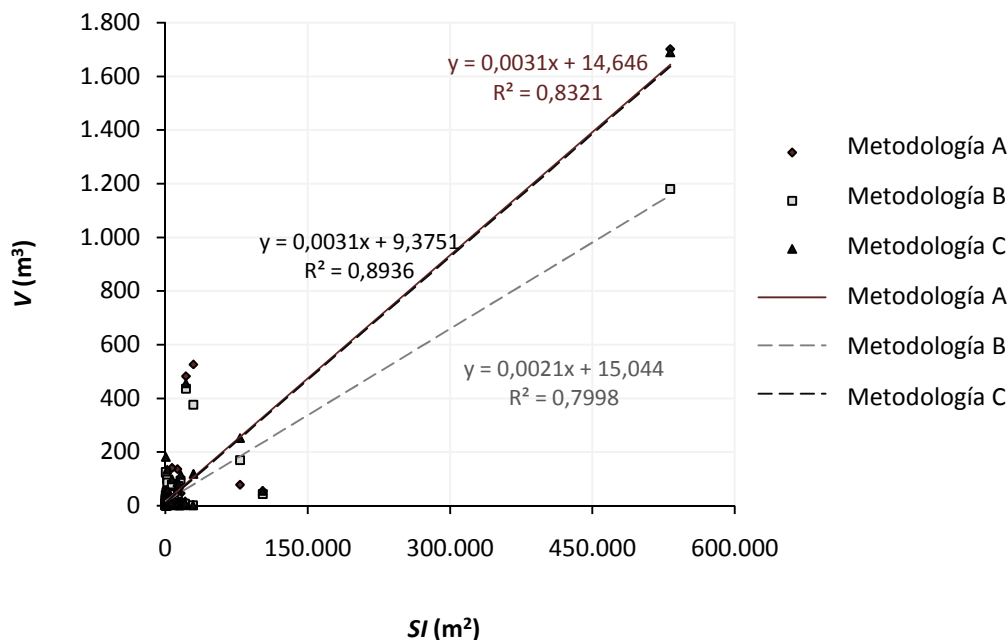


Figura 4.9. Ajustes de regresión entre la superficie de aportación individual (SI , m^2) y el volumen de sedimentos obtenido por aplicación de las metodologías A, B y C (V_A , V_B y V_C , m^3)



4.2.2. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS EN CUANTO AL RENDIMIENTO EN CAMPO

Por último, se ha estimado el tiempo medio empleado para la aplicación de cada metodología. En el caso A (metodología propuesta), se ha estimado una media de 10 minutos dedicados a estacionamiento y colocación de cinta métrica y un tiempo variable para la medición de cada sección transversal en función del ancho de la cuña, a razón de 1 minuto por metro de sección transversal, incluyendo entre estas secciones la realizada aguas abajo del dique para estimar la cuenca original sobre la que se apoya la cuña. En las metodologías B y C se ha estimado la medición de cada parámetro a razón de un minuto cada 4 metros de longitud. De esta forma, en estas dos metodologías, los tiempos estimados dependen del número de parámetros que es necesario medir en campo. En la Tabla 4.23 se realiza una comparación de resultados del volumen medio por dique y en cada uno de los casos indicados (A, B y C), incluyendo el tiempo empleado para su aplicación.

El tiempo empleado es notablemente superior en el caso A que en los casos B y C, concretamente un 71 % más que el caso B y un 93 % más que el caso C (Figura 4.10). Se trata por lo tanto de un inconveniente importante para la utilización de la metodología propuesta, salvo que la exactitud conseguida justificara un mayor coste en tiempo y dinero. No se puede conocer el volumen real de sedimentos retenidos, por lo que no es posible comparar los resultados obtenidos en los tres casos y así conocer cuál de los métodos es el que más se aproxima. Pero a este respecto, la metodología propuesta, como se ha indicado anteriormente, es geoméricamente más ajustada que las otras dos, y contempla un mayor número de mediciones de campo que, además, son más detalladas y representativas. Por otra parte, al utilizar la fórmula del prismoide la exactitud es mayor que al utilizar la fórmula de la sección media, como ya se dijo anteriormente, según Casanova (2002). Así mismo, la metodología propuesta estima el lecho original del cauce (cárcava o barranco) partiendo de una sección real (la sección aguas abajo del dique) y uniéndola con la sección o punto de inicio real de la cuña de sedimentos. Esta estimación es mucho más realista que la que utilizan las otras metodologías, que toman una forma de cuña predeterminada, en concreto un canal prismático de sección rectangular (Castillo *et al.*, 2007) y una pirámide de base trapezoidal (Romero, 2008). Además, como ya se ha indicado, el equipo de medición empleado también es importante, aunque las metodologías en sí no varían, y en este trabajo se ha empleado el mismo equipo, una estación total, de gran precisión en la medición, lo cual mejora la exactitud de las metodologías aplicadas.

Tabla 4.23. Tiempo empleado en trabajo de campo y volumen medio de la cuña de sedimentos, obtenidos de la aplicación de las distintas metodologías

	A	B	C
Tiempo (min)	38,35	11,11	9,05
Volumen (m ³)	47,49	38,08	42,19

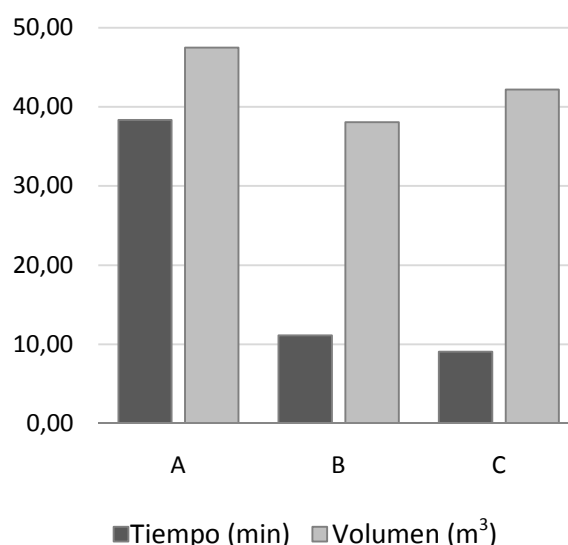


Figura 4.10. Valores medios del volumen de sedimentos, obtenidos de la aplicación de las distintas metodologías (A, B y C, m³), y tiempo empleado en aplicarlas (min)

4.3. DENSIDAD APARENTE

Los datos resultantes de la medida de la densidad aparente de las cuñas de los diques de la restauración de Tórtoles se muestran en la Tabla 4.24. No se trata de valores directos, sino de la media entre dos valores, correspondientes a las dos medidas realizadas en cada cuña con el método del cilindro. La estadística descriptiva de esta variable se muestra en la Tabla 4.25. La densidad aparente media de los sedimentos retenidos en los diques es de $1,36 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, con una desviación típica de $0,23 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$. Los valores varían desde $0,65$ a $2,08 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$. El gráfico de caja y bigotes (Figura 4.11) indica que la mayor parte de los valores se encuentran cercanos y agrupados, entre 1 y $1,65 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, excepto algunos valores que se escapan de este rango, tanto por encima como por debajo. Además, el histograma de frecuencias (Figura 4.12) indica que la mayoría de las cuñas de sedimentos presentan una densidad aparente de entre $1,25$ y $1,5 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$.

Tabla 4.24. Densidad aparente de las cuñas de los diques (D_a , $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)

Dique	D_a ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dique	D_a ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dique	D_a ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dique	D_a ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	1,13	32	1,56	63	1,47	94	1,33
2	1,43	33	1,62	64	1,15	95	1,36
3	1,44	34	1,58	65	1,45	96	1,04
4	1,39	35	1,57	66	1,30	97	0,79
5	0,91	36	1,54	67	1,26	98	1,11
6	1,46	37	1,33	68	1,32	99	1,08
7	1,16	38	1,45	69	1,40	100	0,92
8	1,24	39	0,93	70	1,24	101	1,05
9	1,30	40	1,27	71	1,32	102	1,43
10	1,00	41	1,26	72	1,29	103	1,30
11	1,53	42	1,23	73	1,16	104	1,33



Dique	Da ($t \cdot m^{-3}$)	Dique	Da ($t \cdot m^{-3}$)	Dique	Da ($t \cdot m^{-3}$)	Dique	Da ($t \cdot m^{-3}$)
12	0,65	43	1,37	74	1,44	105	1,38
13	1,47	44	1,58	75	1,30	106	1,50
14	1,34	45	1,42	76	1,29	107	1,50
15	1,45	46	1,50	77	1,78	108	1,38
16	1,52	47	1,27	78	1,28	109	1,23
17	1,39	48	1,44	79	2,08	110	1,34
18	1,40	49	1,59	80	1,59	111	1,29
19	1,43	50	1,29	81	1,91	112	1,42
20	1,46	51	1,40	82	1,57	113	1,39
21	1,37	52	1,46	83	1,36	114	1,43
22	1,35	53	1,59	84	1,81	115	1,56
23	0,92	54	1,05	85	1,91	116	1,51
24	1,02	55	1,08	86	-	117	1,32
25	1,65	56	1,48	87	1,37	118	1,34
26	1,14	57	1,37	88	1,29	119	1,38
27	1,44	58	1,30	89	1,40	120	1,49
28	2,07	59	1,51	90	1,23	121	1,39
29	1,46	60	1,48	91	1,26	122	1,61
30	1,27	61	0,87	92	1,34	123	1,45
31	0,72	62	1,42	93	1,40	MEDIA	1,36

Tabla 4.25. Estadística descriptiva de la densidad aparente de las cuñas de los diques de la restauración de Tórtoles (Da , $t \cdot m^{-3}$)

	Da ($t \cdot m^{-3}$)
Media aritmética	1,36
Mediana	1,38
Desviación típica	0,23
Varianza	0,05
Coefficiente de Variación (%)	17,01
Mínimo	0,65
Máximo	2,08
Rango	1,43
Sesgo Estandarizado	-0,44
Curtosis	1,92
Curtosis Estandarizada	4,30

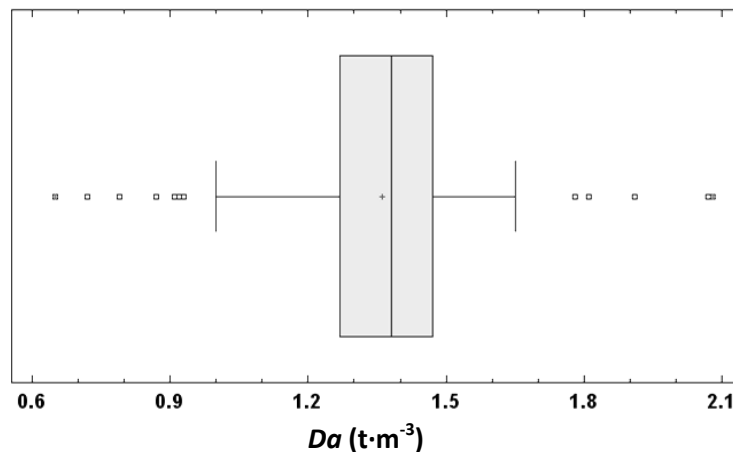
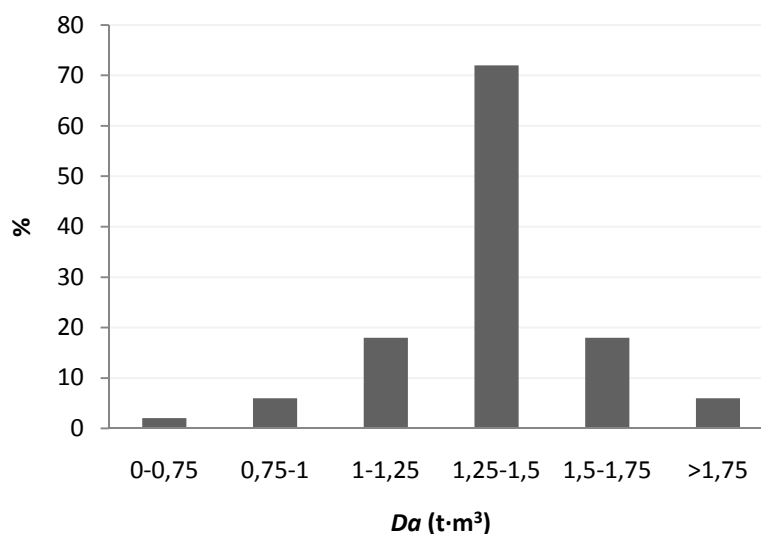


Figura 4.11. Gráfico de caja y bigotes de la densidad aparente de los sedimentos de las cuñas (D_a , $t \cdot m^{-3}$)Figura 4.12. Histograma de frecuencias de la densidad aparente de los sedimentos (D_a , $t \cdot m^{-3}$)

4.4. GRANULOMETRÍA Y TEXTURA

La información sobre la granulometría y la textura de las cuñas de los diques estudiados se muestran en la Tabla 4.26. Como puede observarse, el porcentaje de elementos gruesos es elevado, con un valor medio de 43,00 %, con un mínimo de 16,03 % y un máximo de 81,64 % de elementos gruesos, alcanzando por tanto la tierra fina un valor medio de 57,00 %.

La textura de las cuñas varía desde arcillosa hasta arenosa (USDA, 2014b), si bien destacan las texturas mayoritariamente arenosas, ya sean arcillo-arenosas o franco-arcillo-arenosas. La textura media, obtenida como la media entre los porcentajes de arena, limo y arcillo de la totalidad de las cuñas, es franco-arcillo-arenosa, con valores medios de 66,0% de arena, 7,6% de limo y 26,4% de arcilla. El porcentaje de arcilla es bastante elevado o superior a lo esperado al tratarse de una zona granítica. Esto puede ser debido a que cuando se meteoriza el granito, las micas y las plagioclasas se transforman en caolinita, vermiculita, esmectita y goethita, que son minerales de arcilla y cuyo tamaño de partícula suele ser tamaño arcilla.

Es necesario añadir, además, que la toma de muestras se ha realizado en superficie y no en profundidad, y las cuñas se van formando acumulándose en primer lugar (parte inferior de la cuña) los elementos gruesos, de mayor peso, escapándose por los huecos entre gaviones las partículas más finas, y a continuación se van acumulando las partículas de menor tamaño, por lo que es de esperar menores tamaños de partícula en las capas más superficiales.



Tabla 4.26. Granulometría y texturas de los sedimentos de las cuñas (1/3)

Muestra	EG (%)	TF (%)	A (%)	L (%)	Ac (%)	Textura
1	57,48	42,52	60,0	0,0	40,0	Arcillo arenosa
2	39,82	60,18	70,0	0,0	30,0	Franco arcillo arenosa
3	43,10	56,90	72,5	2,5	25,0	Franco arcillo arenosa
4	38,58	61,42	65,0	10,0	25,0	Franco arcillo arenosa
5	36,03	63,97	40,0	20,0	40,0	Franco arcillosa
6	37,71	62,29	70,0	0,0	30,0	Franco arcillo arenosa
7	37,02	62,98	50,0	17,5	32,5	Franco arcillo arenosa
8	67,52	32,48	60,0	5,0	35,0	Franco arcillo arenosa
9	42,75	57,25	83,0	15,0	2,0	Arenosa-franca
10	47,12	52,88	60,0	5,0	35,0	Franco arcillo arenosa
11	47,79	52,21	60,0	15,0	25,0	Franco arcillo arenosa
12	81,64	18,36	40,0	10,0	50,0	Arcillosa
13	21,64	78,36	70,0	2,5	27,5	Franco arcillo arenosa
14	61,28	38,72	77,5	2,5	20,0	Franco arcillo arenosa
15	44,76	55,24	65,0	5,0	30,0	Franco arcillo arenosa
16	44,13	55,87	77,5	2,5	20,0	Franco arenosa
17	31,54	68,46	75,0	2,5	22,5	Franco arcillo arenosa
18	47,10	52,90	50,0	10,0	40,0	Arcillo arenosa
19	45,58	54,42	67,5	7,5	25,0	Franco arcillo arenosa
20	56,64	43,36	50,0	7,5	42,5	Arcillo arenosa
21	42,35	57,65	67,5	7,5	25,0	Franco arcillo arenosa
22	67,09	32,91	75,0	12,5	12,5	Franco arenosa
23	66,25	33,75	40,0	20,0	40,0	Arcillosa
24	26,27	73,73	57,5	5,0	37,5	Arcillo arenosa
25	31,97	68,03	91,0	8,0	1,0	Arenosa
26	40,76	59,24	68,0	7,0	25,0	Franco arcillo arenosa
27	42,31	57,69	60,0	5,0	35,0	Franco arcillo arenosa
28	34,58	65,42	67,5	5,0	27,5	Franco arcillo arenosa
29	35,89	64,11	50,0	7,5	42,5	Arcillo arenosa
30	47,88	52,12	55,0	10,0	35,0	Franco arcillo arenosa
31	40,76	59,24	68,0	7,0	25,0	Franco arcillo arenosa
32	40,76	59,24	68,0	7,0	25,0	Franco arcillo arenosa
33	65,75	34,25	72,5	0,0	27,5	Franco arcillo arenosa
34	24,97	75,03	65,0	10,0	25,0	Franco arcillo arenosa
35	69,44	30,56	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
36	68,56	31,44	70,0	7,5	22,5	Franco arcillo arenosa
37	50,70	49,30	60,0	10,0	30,0	Franco arcillo arenosa
38	42,20	57,80	70,0	10,0	20,0	Franco arenosa
39	66,56	33,44	70,0	10,0	20,0	Franco arenosa
40	67,69	32,31	70,0	2,5	27,5	Franco arcillo arenosa
41	53,16	46,84	70,0	5,0	25,0	Franco arcillo arenosa
42	61,00	39,00	70,0	10,0	20,0	Franco arenosa
43	43,00	57,00	55,0	15,0	30,0	Franco arcillo arenosa
44	66,01	33,99	60,0	10,0	30,0	Franco arcillo arenosa

EG (%): porcentaje de elementos gruesos; A (%): porcentaje de arena; L (%): porcentaje de limo; Ar (%): porcentaje de arcilla. Clases granulométricas y texturas según USDA (2014).



Tabla 4.26. Granulometría y texturas de los sedimentos de las cuñas (2/3)

Muestra	EG (%)	TF (%)	A (%)	L (%)	Ac (%)	Textura
45	41,61	58,39	72,5	5,0	22,5	Franco arcillo arenosa
46	40,24	59,76	77,5	2,5	20,0	Franco arenosa
47	42,07	57,93	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
48	53,84	46,16	72,5	5,0	22,5	Franco arcillo arenosa
49	41,45	58,55	77,5	2,5	20,0	Franco arenosa
50	40,51	59,49	77,5	2,5	20,0	Franco arenosa
51	42,79	57,21	77,5	2,5	20,0	Franco arenosa
52	28,04	71,96	80,0	0,0	20,0	Franco arenosa
53	30,80	69,20	59,0	11,0	30,0	Franco arcillo arenosa
54	49,00	51,00	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
55	45,65	54,35	57,5	2,5	40,0	Arcillo arenosa
56	47,24	52,76	60,0	7,5	32,5	Franco arcillo arenosa
57	34,51	65,49	72,5	2,5	25,0	Franco arcillo arenosa
58	39,66	60,34	60,0	5,0	35,0	Franco arcillo arenosa
59	40,26	59,74	70,0	2,5	27,5	Franco arcillo arenosa
60	61,09	38,91	70,0	0,0	30,0	Franco arcillo arenosa
61	34,05	65,95	10,0	30,0	60,0	Arcillosa
62	47,13	52,87	60,0	5,0	35,0	Franco arcillo arenosa
63	33,54	66,46	98,0	2,0	0,0	Arenosa
64	37,06	62,94	50,0	10,0	40,0	Arcillo arenosa
65	47,26	52,74	60,0	5,0	35,0	Franco arcillo arenosa
66	57,79	42,21	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
67	39,32	60,68	47,5	2,5	50,0	Arcillo arenosa
68	33,86	66,14	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
69	24,97	75,03	65,0	0,0	35,0	Franco arcillo arenosa
70	42,65	57,35	57,5	2,5	40,0	Arcillo arenosa
71	49,96	50,04	65,0	2,5	32,5	Franco arcillo arenosa
72	38,85	61,15	79,0	12,0	9,0	Arenosa franca
73	57,05	42,95	72,5	2,5	25,0	Franco arcillo arenosa
74	37,53	62,47	94,0	6,0	0,0	Arenosa
75	33,39	66,61	90,0	8,0	2,0	Arenosa
76	33,09	66,91	81,0	11,0	8,0	Arenosa franca
77	41,68	58,32	59,0	10,0	31,0	Franco arcillo arenosa
78	17,24	82,76	65,0	2,0	33,0	Franco arcillo arenosa
79	40,91	59,09	67,0	3,0	30,0	Franco arcillo arenosa
80	49,07	50,93	68,0	2,0	30,0	Franco arcillo arenosa
81	24,22	75,78	61,0	9,0	30,0	Franco arcillo arenosa
82	22,40	77,60	60,0	9,0	31,0	Franco arcillo arenosa
83	16,03	83,97	60,0	8,0	32,0	Franco arcillo arenosa
84	37,51	62,49	30,0	20,0	50,0	Arcillosa
85	55,04	44,96	60,0	9,0	31,0	Franco arcillo arenosa
86	-	-	-	-	-	-
87	31,39	68,61	59,0	16,0	25,0	Franco arcillo arenosa
88	39,93	60,07	76,0	12,0	12,0	Franco arenosa

EG (%): porcentaje de elementos gruesos; A (%): porcentaje de arena; L (%): porcentaje de limo; Ar (%): porcentaje de arcilla. Clases granulométricas y texturas según USDA (2014).



Tabla 4.26. Granulometría y texturas de los sedimentos de las cuñas (3/3)

Muestra	EG (%)	TF (%)	A (%)	L (%)	Ac (%)	Textura
89	39,57	60,43	57,0	15,0	28,0	Franco arcillo arenosa
90	40,61	59,39	51,0	19,0	30,0	Franco arcillo arenosa
91	39,78	60,22	60,0	19,0	21,0	Franco arcillo arenosa
92	38,95	61,05	92,0	8,0	0,0	Arenosa
93	39,66	60,34	91,0	9,0	0,0	Arenosa
94	25,97	74,03	90,0	10,0	0,0	Arenosa
95	31,33	68,67	96,0	4,0	0,0	Arenosa
96	42,87	57,13	58,0	23,0	19,0	Franco arenosa
97	36,18	63,82	58,0	24,0	18,0	Franco arenosa
98	17,11	82,89	68,0	22,0	10,0	Franco arenosa
99	24,25	75,75	58,0	31,0	11,0	Franco arenosa
100	36,25	63,75	61,0	24,0	15,0	Franco arenosa
101	22,73	77,27	64,0	28,0	8,0	Franco arenosa
102	26,42	73,58	83,0	17,0	0,0	Arenosa franca
103	54,14	45,86	60,0	14,0	26,0	Franco arcillo arenosa
104	51,75	48,25	60,0	7,5	32,5	Franco arcillo arenosa
105	48,39	51,61	75,0	2,5	22,5	Franco arcillo arenosa
106	75,18	24,82	65,0	5,0	30,0	Franco arcillo arenosa
107	49,73	50,27	70,0	0,0	30,0	Franco arcillo arenosa
108	35,17	64,83	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
109	48,11	51,89	60,0	7,5	32,5	Franco arcillo arenosa
110	52,29	47,71	70,0	7,5	22,5	Franco arcillo arenosa
111	42,55	57,45	65,0	2,5	32,5	Franco arcillo arenosa
112	53,86	46,14	62,5	2,5	35,0	Franco arcillo arenosa
113	48,08	51,92	70,0	2,5	27,5	Franco arcillo arenosa
114	46,60	53,40	67,5	2,5	30,0	Franco arcillo arenosa
115	30,19	69,81	70,0	0,0	30,0	Franco arcillo arenosa
116	44,44	55,56	77,5	2,5	20,0	Franco arenosa
117	22,84	77,16	70,0	2,5	27,5	Franco arcillo arenosa
118	47,98	52,02	50,0	10,0	40,0	Arcillo arenosa
119	39,57	60,43	57,5	0,0	42,5	Arcillo arenosa
120	46,46	53,54	62,5	0,0	37,5	Arcillo arenosa
121	48,74	51,26	72,5	2,5	25,0	Franco arcillo arenosa
122	34,44	65,56	72,5	0,0	27,5	Franco arcillo arenosa
123	37,33	62,67	65,0	2,5	32,5	Franco arcillo arenosa
MEDIA	43,00	57,00	66,0	7,6	26,4	Franco arcillo arenosa

EG (%): porcentaje de elementos gruesos; A (%): porcentaje de arena; L (%): porcentaje de limo; Ar (%): porcentaje de arcilla. Clases granulométricas y texturas según USDA (2014).

4.5. OTRAS VARIABLES

En este apartado se analizan las variables accesorias para el cálculo de las variables principales del estudio: altura de aterramiento (AA , m), longitud de la cuña (LC , m) y superficie de la cuenca de aportación individual (SI , m^2), cuyos valores se muestran en la Tabla 4.27 y la estadística descriptiva de éstos se observa en la Tabla 4.28.



Tabla 4.27. Valores de las variables accesorias para los diques de la restauración de Tórtoles

Dique	AA (m)	LC (m)	SI (m ²)	Dique	AA (m)	LC (m)	SI (m ²)	Dique	AA (m)	LC (m)	SI (m ²)
1	0,82	11,10	277,59	41	1,73	7,20	8.558,81	84	2,24	2,00	376,51
2	0,45	8,50	432,34	42	0,99	2,92	1.178,36	85	1,67	2,50	1.767,63
3	0,91	6,80	20.121,95	43	1,30	11,00	2.122,96	87	2,19	6,00	1.099,21
4	3,07	16,00	102.536,79	44	1,53	10,90	2.837,01	88	3,48	5,80	603,22
5	2,06	12,00	4.183,69	45	4,33	6,20	1.483,53	89	1,61	5,90	2.866,07
6	1,52	6,40	11.696,02	46	1,46	5,00	1.042,56	90	3,91	4,30	710,35
7	1,55	5,00	3.384,57	47	3,21	5,80	458,68	91	1,39	1,30	1.944,42
8	0,90	9,50	14.981,91	48	2,10	6,70	1.528,12	92	3,90	7,50	1.267,63
9	1,04	6,00	13.163,04	49	4,56	3,20	328,59	93	2,25	5,35	1.170,82
10	0,43	6,10	15.428,86	50	1,39	3,00	1.264,50	94	2,38	2,20	2.624,70
11	1,86	6,45	17.062,81	51	1,30	6,20	324,57	95	3,23	6,70	3.079,95
12	1,24	3,00	2.993,63	52	1,55	6,70	1.123,92	96	2,45	7,00	20.815,38
13	1,09	12,70	10.184,63	54	0,75	4,00	9.797,65	97	1,10	11,00	11.419,72
14	2,46	10,30	7.643,64	55	1,81	21,70	13.128,60	98	3,56	21,40	16.130,64
15	2,51	9,20	6.338,81	56	1,19	5,20	1.683,81	99	2,50	14,80	8.926,90
16	2,51	11,50	3.688,06	57	2,24	10,50	1.349,87	100	4,04	6,41	6.769,97
17	3,53	7,50	1.553,71	59	0,50	2,90	29.174,57	102	4,17	42,30	29.598,70
18	1,90	6,30	883,03	61	1,29	7,60	451,53	103	6,41	69,00	531.942,72
19	1,71	12,50	743,02	62	3,87	31,00	1.980,03	104	2,54	12,00	2.510,13
20	1,33	10,00	784,12	63	4,14	28,08	12.718,95	105	4,18	16,90	1.096,40
21	0,58	13,30	151,46	64	0,70	17,90	525,00	106	2,19	11,00	3.562,82
22	0,76	9,00	242,64	65	0,39	7,70	145,42	107	4,09	11,90	14.100,55
23	0,55	13,30	279,67	66	0,53	11,70	10.588,55	108	2,25	6,00	10.235,92
24	0,81	9,50	215,08	67	1,02	3,50	328,27	109	1,00	12,00	477,05
25	4,11	29,40	21.662,08	68	1,29	7,80	228,93	110	3,02	12,80	2.124,89
27	4,57	11,90	541,96	69	1,91	10,80	3.138,02	111	2,19	7,85	2.704,83
28	1,49	12,54	539,65	70	1,49	5,30	340,91	112	2,57	11,20	2.310,97
29	2,05	4,20	1.321,94	71	1,43	6,30	1.517,30	113	2,36	15,40	987,26
30	2,39	11,50	1.191,74	72	1,80	5,70	724,03	114	4,46	15,40	7.038,03
32	2,20	26,80	78.704,03	74	0,66	6,00	4.337,19	116	2,56	5,80	968,29
33	3,30	4,50	236,91	75	1,25	5,80	858,35	117	2,08	12,90	4.806,22
34	2,42	3,70	244,39	76	0,68	4,50	1.062,96	118	1,55	10,70	2.727,62
35	2,22	6,00	229,42	78	1,61	8,40	2.942,35	119	2,00	10,70	8.598,58
36	1,84	10,10	172,35	79	3,17	3,60	13.423,26	120	2,36	6,00	3.732,46
37	0,96	9,40	208,36	80	1,62	4,30	638,91	121	2,45	8,00	3.384,99
38	0,82	2,92	950,07	81	1,48	2,40	190,79	122	2,43	9,80	4.875,78
39	1,80	9,40	2.504,28	82	2,18	2,40	393,30	123	1,43	11,40	6.278,28
40	2,50	5,10	2.932,02	83	1,53	3,40	2.493,59	MEDIA	2,07	9,75	10.729,70

AA: altura de aterramiento; LC: longitud de la cuña; SI: superficie individual de la cuenca de aportación

Las alturas de las cuñas de los 113 diques estudiados varían de 0,39 m a 6,41 m. El valor medio de esta variable es 2,07 m. En cuanto a la longitud, las cuñas tienen una extensión que varía desde 1,30 m hasta 69,0 m, con un valor medio de 9,75 m. Por último, las superficies de las cuencas de aportación de sedimentos a los diques, consideradas de forma individual para cada dique, tienen una extensión media de 10.729,70 m².

Tabla 4.28. Estadística descriptiva de las variables accesorias

	AA (m)	LC (m)	SI (m ²)
Media aritmética	2,07	9,75	10.729,70
Mediana	1,86	7,60	1.980,03
Desviación típica	1,14	8,51	51.152,20
Varianza	1,31	72,49	2.616,55·10 ⁶
Coefficiente de Variación (%)	55,19	87,31	476,73
Mínimo	0,39	1,30	145,42
Máximo	6,41	69,00	531.942,73
Rango	6,02	67,70	531.797,31
Sesgo Estandarizado	4,19	17,11	42,04
Curtosis	0,96	22,19	98,59
Curtosis Estandarizada	2,08	48,15	213,93

AA: altura de aterramiento; LC: longitud de la cuña; SI: superficie individual de la cuenca de aportación

4.6. MASA DE SEDIMENTOS

La masa de sedimentos se obtiene a partir del producto de la densidad aparente media de cada cuña (Tabla 4.24) y el volumen de sedimentos calculado por aplicación de cada metodología. Los resultados para cada dique y para cada metodología en el cálculo del volumen se muestran en la Tabla 4.29.

De acuerdo con este trabajo y con la metodología propuesta para el cálculo del volumen (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b), el valor medio de la masa de sedimentos atrapados en los diques de la restauración de Tórtoles es de 65,65 t por dique, con un intervalo que varía de 1,15 t a 2.216,40 t en los 113 diques medidos, lo cual supone un total de 7.418,96 t y una media de 65,65 t de sedimentos por dique. De nuevo se observan valores muy superiores en otros estudios, como los realizados en la provincia de Murcia. Romero *et al.* (2007a) analizan los diques construidos en la cuenca del río Quípar (Murcia) y obtienen un rango de volúmenes de sedimentos que varía de 0,4 t a 19.696 t, con una media de 1.998 t de sedimentos retenidos por dique. Y Romero *et al.* (2007b), que estudian los sedimentos retenidos en una subcuenca de la cuenca del río Quípar, concluyen que se han retenido un total de 284.027 t de sedimentos, siendo mayor el volumen en aquellos barrancos con desarrollo de cárcavas. Esto supone una media de 668,30 t de sedimentos por dique en la subcuenca del río Quípar. Si nos centramos en las cuencas con cárcavas el valor asciende a 1.965,06 t de sedimentos por dique.



Tabla 4.29. Masa de los sedimentos retenidos (t), de acuerdo con la metodología propuesta (SW_A), con la metodología de Castillo *et al.* (2007) (SW_B) y con la metodología de Romero *et al.* (2007a) (SW_C)

Dique	SW_A (t)	SW_B (t)	SW_C (t)	Dique	SW_A (t)	SW_B (t)	SW_C (t)	Dique	SW_A (t)	SW_B (t)	SW_C (t)
1	4,58	3,19	5,12	41	26,90	24,99	26,31	84	5,95	3,10	4,05
2	3,12	1,80	3,66	42	2,42	1,75	2,05	85	8,61	5,71	10,58
3	3,44	2,89	3,71	43	12,11	10,34	13,02	87	67,85	41,32	33,82
4	75,75	61,06	76,00	44	23,35	21,32	19,34	88	37,14	23,89	32,07
5	41,49	32,25	28,12	45	67,48	74,18	62,40	89	10,91	6,74	8,66
6	22,87	16,69	15,63	46	9,06	9,56	23,66	90	17,66	16,54	13,44
7	3,74	4,63	3,31	47	64,03	40,99	43,26	91	1,61	0,79	1,35
8	6,32	3,55	3,19	48	13,17	11,77	10,09	92	47,74	40,05	41,03
9	3,95	2,67	3,39	49	37,55	28,84	38,65	93	20,96	16,53	24,15
10	1,17	1,24	1,31	50	9,27	5,75	7,21	94	17,43	8,72	11,45
11	12,87	9,64	12,24	51	20,57	18,78	17,04	95	46,38	38,75	35,32
12	1,15	1,28	1,36	52	36,16	39,15	32,58	96	16,49	8,61	8,95
13	11,90	12,18	12,18	54	2,81	2,53	3,15	97	7,41	11,21	9,61
14	43,56	44,68	23,19	55	77,30	29,09	60,41	98	50,67	103,95	127,29
15	54,81	42,66	39,03	56	16,49	9,00	9,18	99	30,31	43,15	19,91
16	43,54	25,94	45,52	57	62,58	50,29	56,71	100	27,03	30,23	23,87
17	92,67	33,07	41,16	59	2,79	2,10	1,61	102	750,32	536,73	167,79
18	7,21	5,91	4,45	61	6,92	6,09	6,23	103	2.216,40	1.536,10	2.199,91
19	25,46	26,80	30,41	62	144,42	137,58	188,25	104	117,82	105,04	74,55
20	14,11	14,92	14,60	63	199,18	100,67	126,23	105	68,82	55,48	81,29
21	8,69	3,26	3,35	64	6,90	2,44	3,15	106	43,49	39,09	36,08
22	5,00	3,30	3,07	65	4,09	1,70	1,74	107	136,86	109,37	121,53
23	4,77	3,16	3,89	66	2,39	5,25	3,86	108	22,94	16,33	12,81
24	7,61	5,54	4,62	67	2,07	1,87	1,72	109	13,62	9,80	9,80
25	795,47	718,18	751,42	68	12,39	10,60	7,29	110	114,38	116,30	77,53
27	155,68	180,43	260,54	69	56,93	26,47	19,25	111	27,12	29,01	21,81
28	84,00	83,69	40,56	70	6,39	5,53	7,45	112	35,48	40,87	47,68
29	12,61	16,39	20,88	71	10,48	8,60	7,91	113	45,99	26,29	33,62
30	56,74	60,72	69,73	72	31,04	17,02	18,50	114	200,40	113,26	139,09
32	120,77	264,75	392,42	74	7,62	4,72	8,32	116	18,35	11,78	19,82
33	55,16	41,88	44,20	75	9,83	8,01	8,79	117	57,92	56,58	41,47
34	17,57	15,00	8,74	76	6,61	4,28	3,62	118	9,62	9,60	9,97
35	26,30	11,76	11,84	78	16,19	9,25	7,22	119	39,45	29,83	32,05
36	24,48	19,03	22,26	79	40,13	30,49	29,30	120	18,76	15,05	20,06
37	6,29	6,98	9,37	80	6,87	6,13	4,98	121	22,74	32,78	22,31
38	1,52	0,91	1,56	81	4,00	3,83	3,41	122	42,76	47,43	33,11
39	45,49	51,35	36,87	82	6,43	3,91	5,22	123	16,05	13,79	15,76
40	14,81	9,53	16,16	83	3,96	3,61	3,55	TOTAL	7.418,96	5.971,18	6.585,29



Romero (2008), en la misma cuenca obtiene un volumen total depositado en 378 diques que asciende a 687.416 t, lo que supone una media de 1.818,56 t de sedimentos por dique, gran parte de las cuáles han dejado de mermar la capacidad del embalse Alfonso XII. Romero *et al.* (2012) obtienen un valor similar, con una media de 1.566,20 t de sedimentos por dique. Castillo *et al.* (2011) estimaron los sedimentos retenidos en los diques construidos en la Cuenca de la Rogativa (Murcia) aplicando el modelo Water-Sedem (basado en el desarrollo SIG mediante el software IDRISI), y obtuvieron un total de 1.861 t de sedimentos retenidos a lo largo de 42 años, lo que supone una media de 32,01 t de sedimentos por cada dique, valor muy inferior a los obtenidos en esa zona, si bien por aplicación de otras metodologías. Por último, en la cuenca del río Carrión (Palencia), Ramos *et al.* (2013) obtienen un valor de 200,16 t de sedimentos retenidos por dique, y Ramos (2014) obtiene un valor medio de 227,68 t por dique, ambos por aplicación de la metodología propuesta (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b), valores más cercanos a los obtenidos en este trabajo para la cuenca del río Corneja (Ávila), que posee un clima similar al de la cuenca del río Carrión (Palencia).

El valor medio obtenido en este trabajo por aplicación de la metodología propuesta para la estimación del volumen (A) es un 19,51% superior que en el caso de la metodología para la estimación del volumen propuesta por Castillo *et al.* (2007) (B) y un 11,24% superior que en el caso de la metodología para la estimación del volumen propuesta por Romero *et al.* (2007a) (C) (Tabla 4.30, Figura 4.13). Los valores de masa de sedimentos varían de 1,15 t hasta 2.215,24 t en el caso de la metodología A de estimación del volumen, es decir, un rango muy amplio que sigue la misma tendencia que el volumen de sedimentos. Este rango es un 30,69% inferior en el caso de la metodología B y un 0,75% inferior en el caso de la metodología C.

Tabla 4.30. Estadística descriptiva de la masa de sedimentos (t), obtenida de la aplicación de la metodología propuesta (SW_A), de la metodología de Castillo *et al.* (2007) (SW_B) y de la metodología de Romero *et al.* (2007a) (SW_C)

	SW_A (t)	SW_B (t)	SW_C (t)
Media aritmética	65,65	52,84	58,28
Mediana	18,06	14,81	15,91
Desviación típica	229,81	166,65	220,67
Varianza	52.813,46	27.773,00	48.694,92
Coefficiente de Variación (%)	350,03	315,38	378,66
Mínimo	1,15	0,70	1,31
Máximo	2.216,40	1.536,10	2.199,91
Rango	2.215,24	1.535,31	2.198,60
Sesgo Estandarizado	34,62	31,34	37,43
Curtosis	70,89	59,12	81,47
Curtosis Estandarizada	153,81	128,29	176,77

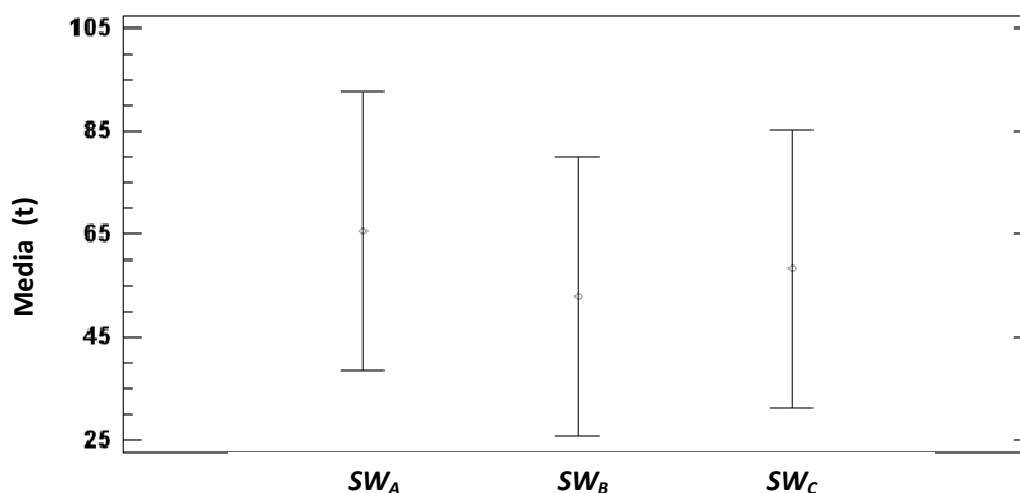


Figura 4.13. Comparación de la masa de sedimentos retenida de media en los diques forestales de Tórtoles por aplicación de las metodologías A, B y C (SW_A, SW_B y SW_C, t)

Tanto el sesgo estandarizado como la curtosis estandarizados muestran desviaciones importantes de la normalidad, por lo que en lugar de realizar la comparación mediante un ANOVA se realiza la prueba de Kruskal-Wallis que compara medianas y la prueba de Levene que compara desviaciones típicas. La prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 4.31) indica que el P-valor es superior a 0,05, por lo que se puede afirmar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.31. Prueba de Kruskal-Wallis para la masa de sedimentos obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C (SW_A, SW_B y SW_C, t)

	Rango Promedio
SW _A	180,58
SW _B	163,41
SW _C	166,02

Estadístico = 2,0137 P-valor = 0,3654

Sin embargo, la prueba de Levene (Tabla 4.32) indica que si se evalúa cada par de muestras sí que existen diferencias significativas entre la metodología B y las metodologías A y C, no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre las metodologías A y C.

Considerando la totalidad de los diques, gracias al análisis de regresión realizado para la variable "Volumen de sedimentos" y a la metodología propuesta para su determinación, se puede estimar que la totalidad de la masa de sedimentos retenidos en los diques de la restauración de Tórtoles asciende a 8.408,74 t. Esta cantidad, por tanto, no ha sido transportada aguas abajo, con sus consecuencias en el aterramiento de los embalses ubicados aguas abajo de la zona de estudio, ni ha perjudicado a la fauna piscícola de los cursos de agua existentes en esta zona.

Tabla 4.32. Prueba de Levene para la masa de sedimentos obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C (SW_A , SW_B y SW_C , t)

Prueba		P-valor	
0,1670		0,8463	

Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-Valor
SW_A / SW_B	229,812	166,652	1,90161	0,0008
SW_A / SW_C	229,812	220,669	1,08458	0,6682
SW_B / SW_C	166,652	220,669	0,570347	0,0032

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la diferencia entre metodologías es mayor cuanto mayor es la masa de sedimentos retenida (Figura 4.14). La Tabla 4.33 muestra, por rangos de masa, las diferencias medias en las mediciones obtenidas entre las metodologías A y B y entre las metodologías B y C, en valor absoluto. La diferencia entre las metodologías A y B varía de 4,02 t para diques que retienen de 0 a 50 t, hasta 264,58 t para aquellos diques que retienen más de 200 t, es decir, 260,56 t de diferencia entre metodologías para diques de dimensiones muy dispares. La diferencia entre las metodologías A y C también es elevada, varía de 4,08 t para diques que retienen de 0 a 50 t, hasta 276,09 t para aquellos diques que retienen más de 200 t, es decir, 172,51 t de diferencia entre distintos tamaños de dique. De esta forma se obtiene que cuanto mayores son los diques y cuanto mayores son las masas de sedimentos retenidas, las diferencias entre la metodología propuesta en esta tesis (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b) y las metodologías más sencillas propuestas por Castillo *et al.* (2007) y Romero *et al.* (2007a) son mayores. Por tanto, si la metodología propuesta se hubiera aplicado a cuencas con mayores tamaños de diques o con mayores volúmenes de sedimentos retenidos, como los estudios revisados anteriormente expuestos, la diferencia entre metodologías quedaría más patente.

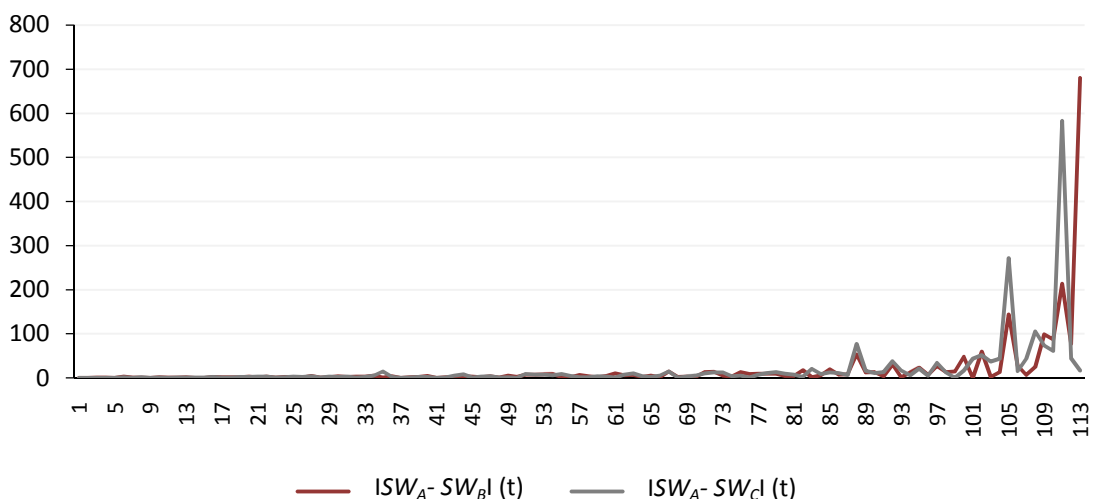


Figura 4.14. Diferencias entre las masas de sedimentos obtenidas por aplicación de las metodologías A y B (SW_A y SW_B , t) y entre las metodologías A y C (SW_A y SW_C , t), en valor absoluto



Tabla 4.33. Diferencias medias entre las masas de sedimentos (SW , t) obtenidas por aplicación de las metodologías A y B (SW_A y SW_B) y entre las metodologías A y C (SW_A y SW_C), en valor absoluto y por agrupación de los datos

SW (t)	Valor medio $ SW_A - SW_B $ (t)	Valor medio $ SW_A - SW_C $ (t)
0-50	4,02	4,08
50-100	21,28	24,05
100-200	45,18	84,11
>200	264,58	176,09

4.7. CÁLCULO DE LA EROSIÓN

Son escasos los proyectos de restauración de cárcavas que han sido estudiados tras amplios periodos de tiempo, suficientes para que sean de gran significación ecológica (Vallauri *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b). En este caso de estudio se dispone de un periodo de casi medio siglo, lo que permite observar tasas de erosión y emisión de sedimentos a medio plazo.

Por otra parte, cada vez es más necesaria una estimación lo más exacta posible de la producción de sedimentos por erosión hídrica. La erosión tolerable se ha reducido en Europa a $0,3-1,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Verheijen *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b). Esto quiere decir que una variación de $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en la tasa de erosión como resultado de la aplicación de uno u otro método puede suponer la consideración de erosión tolerable sin que en realidad lo sea. Algunos de los métodos de estimación del volumen de las cuñas de sedimentos y de la producción de sedimentos resultan, en este sentido, de poca exactitud debido a que utilizan principios geométricos muy simplificados (Lien, 2003; May & Gresswell, 2003; Castillo *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007a; Boix-Fayos *et al.*, 2008), que pueden llevar a la subestimación del volumen de sedimentos retenido por los diques, y por lo tanto de su eficacia en la retención.

El cálculo de la erosión en este trabajo se realiza en tres partes, de forma diferenciada:

1. Para los diques cuyo volumen ha sido medido por aplicación de las tres metodologías (113 diques)
2. Para los diques cuyo volumen no ha sido medido por aplicación de las metodologías, para los cuáles se ha realizado un análisis de regresión para su estimación (9 diques). Si bien son 10 los diques no medidos, el décimo dique se elimina de este paso ya que se trata de un dique cementado, cuyo volumen de sedimentos es nulo.
3. Y para el total de la restauración, unificando los datos anteriores (122 diques).

4.7.1. CÁLCULO EN DIQUES MEDIDOS

La tasa de erosión, correspondiente a la erosión retenida por los diques de la restauración, calculada a partir del volumen determinado por aplicación de las metodologías A, B y C (SY_A , SY_B y SY_C) se muestra en la Tabla 4.34.



Tabla 4.34. Tasa de erosión de los diques de la restauración de Tórtoles ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) de acuerdo con la metodología propuesta (SY_A), con las metodologías propuestas por Castillo *et al.* (2007) (SY_B) y por Romero *et al.* (2007a) (SY_C)

Dique	SY_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SY_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Dique	SY_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SY_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Dique	SY_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SY_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
1	3,44	2,39	3,84	41	0,64	0,60	0,63	84	3,29	1,72	2,24
2	1,51	0,87	1,76	42	0,42	0,30	0,36	85	1,01	0,67	1,25
3	0,04	0,03	0,04	43	0,31	0,27	0,34	87	12,86	7,83	6,41
4	0,15	0,12	0,15	44	0,82	0,75	0,68	88	12,83	8,25	11,07
5	2,07	1,61	1,40	45	4,64	5,10	4,29	89	0,79	0,49	0,63
6	0,41	0,30	0,28	46	1,78	1,88	4,65	90	5,18	4,85	3,94
7	0,23	0,28	0,20	47	28,62	18,32	19,34	91	0,17	0,08	0,14
8	0,09	0,05	0,04	48	0,59	0,53	0,45	92	7,85	6,58	6,74
9	0,06	0,04	0,05	49	2,53	1,94	2,61	93	3,73	2,94	4,30
10	0,02	0,02	0,02	50	1,50	0,93	1,17	94	1,38	0,69	0,91
11	0,16	0,12	0,15	51	2,91	2,66	2,41	95	3,14	2,62	2,39
12	0,08	0,09	0,09	52	6,60	7,14	5,94	96	0,17	0,09	0,09
13	0,24	0,25	0,25	54	0,01	0,01	0,01	97	0,14	0,20	0,18
14	1,19	1,22	0,63	55	0,30	0,11	0,24	98	0,65	1,34	1,64
15	1,80	1,40	1,28	56	2,01	1,10	1,12	99	0,71	1,01	0,46
16	2,46	1,47	2,57	57	0,33	0,26	0,30	100	0,83	0,93	0,73
17	12,43	4,43	5,52	59	0,02	0,01	0,01	102	5,28	3,78	1,18
18	1,70	1,39	1,05	61	0,34	0,30	0,31	103	0,87	0,60	0,86
19	7,14	7,51	8,53	62	2,14	2,06	2,82	104	9,78	8,72	6,19
20	3,75	3,96	3,88	63	3,41	3,44	1,64	105	13,08	10,54	15,45
21	11,95	4,49	4,61	64	0,13	0,04	0,06	106	2,54	2,29	2,11
22	4,29	2,83	2,64	65	0,08	0,03	0,03	107	2,02	1,62	1,80
23	3,55	2,35	2,90	66	0,05	0,10	0,07	108	0,47	0,33	0,26
24	7,37	5,37	4,47	67	0,11	0,10	0,10	109	5,95	4,28	4,28
25	7,65	6,91	7,23	68	0,75	0,65	0,44	110	11,21	11,40	7,60
27	59,85	69,36	100,16	69	3,72	1,73	1,26	111	2,09	2,23	1,68
28	32,43	32,31	15,66	70	0,70	0,61	0,82	112	3,20	3,68	4,30
29	1,99	2,58	3,29	71	1,42	1,16	1,07	113	9,70	5,55	7,09
30	9,92	10,62	12,19	72	8,79	4,82	5,24	114	5,93	3,35	4,12
32	0,32	0,70	1,04	74	0,36	0,22	0,39	116	3,95	2,53	4,26
33	48,51	36,83	38,86	75	2,35	1,91	2,10	117	2,51	2,45	1,80
34	14,97	12,79	7,45	76	1,28	0,83	0,70	118	0,73	0,73	0,76
35	23,88	10,68	10,75	78	0,20	0,12	0,09	119	0,96	0,72	0,78
36	29,59	23,01	26,91	79	0,61	0,47	0,45	120	1,05	0,84	1,12
37	6,29	6,98	9,37	80	0,24	0,21	0,17	121	1,40	2,02	1,37
38	0,33	0,20	0,34	81	0,16	0,15	0,13	122	1,83	2,03	1,41
39	3,78	4,27	3,07	82	0,26	0,16	0,21	123	0,53	0,46	0,52
40	1,05	0,68	1,15	83	0,18	0,16	0,16	MEDIA	5,56	4,53	4,86

De acuerdo con la Tabla 4.35, la tasa media de erosión retenida es de $5,56 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ con la metodología A, un 18,44% superior que con la metodología B de estimación del volumen ($4,53 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) y un 12,60% superior que con la metodología C de estimación del volumen ($4,86 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) (Figura 4.15). La media de la tasa de erosión retenida (SY) no muestra diferencias significativas entre las metodologías, con un 95,0% de confianza, según la tabla ANOVA (Tabla 4.36). Sin embargo, los estadísticos mostrados en la Tabla 4.37 indican que existen diferencias entre las desviaciones estándar en su estudio dos a dos, en concreto entre las metodologías B y C.

Tabla 4.35. Estadística descriptiva de la tasa de erosión retenida por los diques de Tórtoles ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), obtenida de la aplicación de la metodología propuesta (SY_A), de la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007) (SY_B) y de la metodología propuesta por Romero *et al.* (2007a) (SY_C)

	SY_A ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)	SY_B ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)	SY_C ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)
Media aritmética	5,56	4,53	4,86
Mediana	2,09	1,76	1,68
Desviación típica	9,15	8,57	10,83
Varianza	83,70	73,36	117,32
Coefficiente de Variación (%)	164,63	188,98	223,00
Mínimo	0,02	0,01	0,01
Máximo	59,85	69,34	100,14
Rango	59,83	69,34	100,14
Sesgo Estandarizado	15,25	21,30	28,84
Curtosis	15,13	31,18	54,65
Curtosis Estandarizada	32,82	67,66	118,59

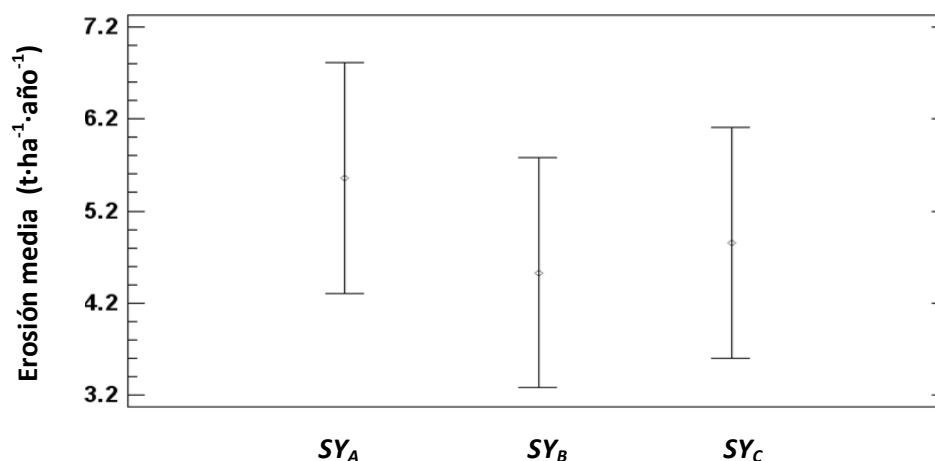


Figura 4.15. Erosión media e intervalos de confianza para los diques de Tórtoles, obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C de estimación del volumen de sedimentos (SY_A , SY_B y SY_C , $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)

Tabla 4.36. Tabla ANOVA para el análisis de la tasa de erosión retenida (SY)

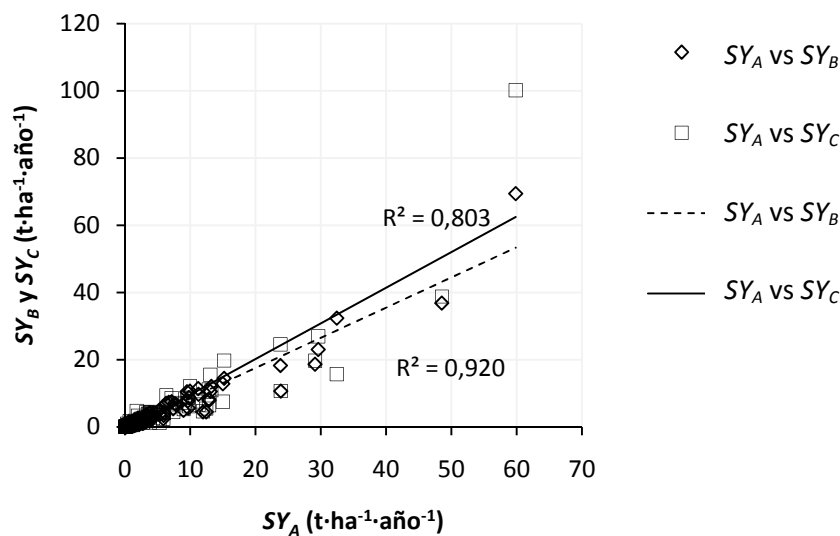
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	61,9992	2	30,9996	0,34	0,7128
Intra grupos	30.730,50	336	91,4599		
Total (Corr.)	30.792,50	338			

Tabla 4.37. Prueba de Levene para el análisis de la tasa de erosión retenida (SY)

Prueba	P-valor
0,4035	0,6683

Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-Valor
SY_A / SY_B	9,1489	8,5651	1,1410	0,4865
SY_A / SY_C	9,1489	10,8313	0,7135	0,0753
SY_B / SY_C	8,5651	10,8313	0,6253	0,0136

En la Figura 4.16 se muestra el gráfico de dispersión de la tasa de erosión (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) obtenida por aplicación de las tres metodologías indicadas. Se puede observar que las metodologías propuestas por Castillo *et al.* (2007) y Romero *et al.* (2007a) (metodologías B y C, respectivamente) correlacionan bien con la metodología propuesta en este trabajo (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b) (metodología A), de forma que el coeficiente R entre la tasa de erosión obtenida con las metodologías A y B de estimación del volumen es 0,9596 y el coeficiente de correlación R entre la tasa de erosión obtenida con las metodologías A y C de estimación del volumen es 0,8965.


 Figura 4.16. Gráfico de dispersión de las tasas de erosión obtenidas por aplicación de las metodologías A, B y C de estimación del volumen (SY_A , SY_B y SY_C , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

4.7.2. CÁLCULO EN DIQUES NO MEDIDOS

Para determinar el volumen de sedimentos retenidos en los diques a los que no se ha podido aplicar la metodología propuesta se aplica la ecuación de regresión obtenida en el apartado 4.3, que estima el volumen retenido por los diques de la restauración de Tórtoles en función de la superficie individual de la cuenca de aportación de sedimentos a ese dique. Se trata de 10 diques, pero uno de ellos se excluye de los cálculos por tratarse de un dique cementado. En la Tabla 4.38 se indican los valores de



los 9 diques que son necesarios para el cálculo de la erosión: Volumen estimado de la cuña de sedimentos, densidad aparente, peso de los sedimentos, superficie individual de la cuenca de aportación y tasa de sedimentos. El valor medio de erosión estimado para los 9 diques que no se han podido medir es de $3,50 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

Tabla 4.38. Volumen estimado de la cuña de sedimentos (V , m^3), densidad aparente (Da , $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$), peso de los sedimentos (SW , t), superficie individual de la cuenca de aportación (SI , m^2) y tasa de sedimentos (SY , $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) de los diques que no se han podido medir por aplicación de la metodología propuesta

Dique	V (m^3)	Da ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	SW (t)	SI (m^2)	SY ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)
26	87,21	1,14	69,08	18.698,38	0,77
31	85,21	0,72	42,12	17.772,59	0,49
53	63,59	1,59	40,10	710,23	11,76
58	63,66	1,30	33,49	1.214,86	5,74
60	90,00	1,48	94,15	19.953,00	0,98
73	317,24	1,16	555,69	97.308,18	1,19
77	64,21	1,78	50,16	2.870,75	3,64
101	87,70	1,05	64,25	1.373,65	0,71
115	63,70	1,56	40,74	1.373,65	6,18

4.7.3. CÁLCULO DE LA EROSIÓN TOTAL

La erosión media retenida en la totalidad de los diques de la restauración de Tórtoles es de $5,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, de acuerdo con la metodología de estimación del volumen de sedimentos propuesta en esta tesis, con un rango que varía de $0,02 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ por dique a $59,85 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ por dique (Tabla 4.39). El 87,7% de los diques retienen tasas de erosión inferiores a $5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Figura 4.17). Estas tasas de erosión obtenidas se corresponden con una intensidad de erosión ligera de acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1979) (Tabla 4.40). Verheijen *et al.* (2009) indican que la erosión tolerable toma valores de $0,3$ a $1,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. En la zona de estudio, de acuerdo con la tasa de erosión retenida se supera este rango, por lo que la erosión no es tolerable.

Tabla 4.39. Estadística descriptiva de la erosión total retenida por los diques (SY_T , $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)

	SY_T ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)
Media aritmética	5,41
Mediana	2,08
Desviación típica	8,87
Varianza	78,73
Coefficiente de Variación (%)	164,16
Mínimo	0,02
Máximo	59,85
Rango	59,83
Sesgo Estandarizado	16,28
Curtosis	16,16
Curtosis Estandarizada	36,43

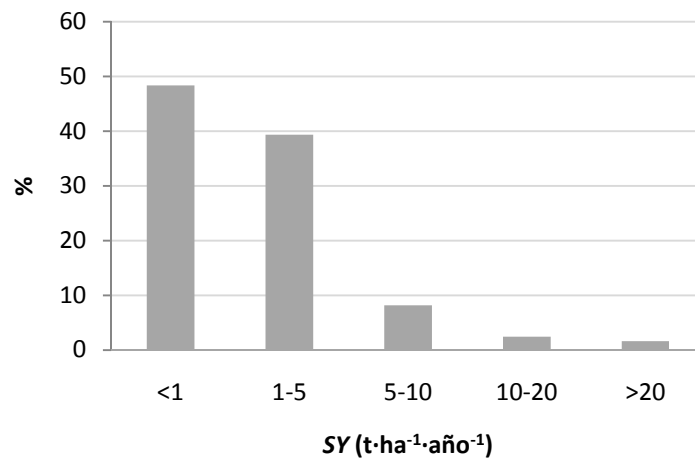

 Figura 4.17. Erosión retenida en los diques de Tórtoles, por intervalos (SY, t·ha⁻¹·año⁻¹)

 Tabla 4.40. Categorías para considerar distintos grados de erosión, expresadas en t·ha⁻¹·año⁻¹ y en mm·año⁻¹ (FAO, 1979)

Intensidad	t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹	mm·año ⁻¹
Ligera	<10	<0,6
Moderada	10-50	0,6-3,3
Alta	50-200	3,3-13,3
Muy alta	>200	>13,3

Romero *et al.* (2007a) y Romero (2008) obtienen tasas de erosión de la cuenca del río Quípar que varían de 0,71 t·ha⁻¹·año⁻¹ a 5,29 t·ha⁻¹·año⁻¹, con un valor medio de tasa de erosión de la cuenca de 3,95 t·ha⁻¹·año⁻¹. El clima en esta región es semiárido, la litología se compone de calizas y dolomías en la parte alta de la cuenca y calizas, margas, yesos, arenas, areniscas y depósitos cuaternarios en la parte baja, y la cubierta vegetal es escasa. Ramos (2014) obtiene una tasa media de erosión en la cuenca del río Carrión (Palencia) de 7,30 t·ha⁻¹·año⁻¹. El rango de tasas de erosión y el valor medio de erosión obtenido en Tórtoles es superior al obtenido por Romero *et al.* (2007a) y Romero (2008), a pesar de que en Tórtoles el clima es mediterráneo continental y litología principalmente granítica. Sin embargo, estas tasas son inferiores a las obtenidas en Saldaña por Ramos (2014), que posee un clima similar. Por otro lado, tanto Romero *et al.* (2007a) y Romero (2008) como Ramos (2014) no estudian la totalidad de los diques. Romero *et al.* (2007a) y Romero (2008) miden 195 de los 425 diques construidos, lo que supone el 45,88% del total; se trata de mediciones tras 7 años de su construcción (o reparación) en algunos casos y tras 40 años de su construcción en otros. Por su parte, Ramos (2014) estudia 25 de los 108 diques construidos en la cuenca del río Carrión (Palencia), lo cual supone el 23,15% del total de los diques, y las mediciones se han realizado tras 77 y 79 años de su construcción. Sin embargo, en el trabajo presentado en esta tesis se han medido en campo el 91,87% de los diques construidos, por lo que la intensidad del muestreo es mayor y eso puede influir en la precisión de las tasas obtenidas en comparación con otros estudios que utilizan muestras de menor tamaño. Además, hay que tener en cuenta que estas tasas de erosión se han conseguido durante los 48 años desde la construcción de los diques



de gaviones, pero también con la implantación de vegetación arbórea que contribuye, asimismo, a la reducción de las tasas de erosión. Es decir, la tasa de erosión se ha ido reduciendo conforme se ha ido desarrollando el arbolado, siendo el resultado obtenido ($5,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) la tasa media de erosión en esos 48 años. Un análisis de las fotografías aéreas existentes permite observar la evolución de la cubierta forestal arbolada a lo largo del tiempo (Figura 4.18). La superficie cubierta de vegetación arbolada se ha visto fuertemente incrementada, de forma que ha pasado de ocupar 8,16 ha en las primeras fotografías aéreas, hasta abarcar una extensión de 73,69 ha en la época actual, con un crecimiento polinomial, tal y como se muestra en la Tabla 4.41 y en la Figura 4.19. De acuerdo con la Figura 4.18 y la Tabla 4.41, en los años anteriores a la repoblación únicamente se observa una masa de robledal en la zona norte del área de estudio. En el año 1977 se observa crecimiento de la vegetación de ribera, que se implantó en los primeros años 70 y está formada principalmente por álamos (*Populus nigra* y *P. tremula*); además, en este mismo año se empiezan a observar los primeros signos de repoblación, si bien aún los árboles no han crecido en toda la superficie, de forma que la superficie cubierta de vegetación procedente de la repoblación va aumentando con el paso de los años (se observa un aumento en 1984) hasta cubrir toda la superficie en la actualidad, lo que se hace patente en las fotografías aéreas de 2002 y 2007. Por su parte, es de esperar que conforme ha aumentado la superficie cubierta por vegetación arbórea, el volumen de sedimentos retenidos por los diques se haya ido reduciendo, de forma que los mayores volúmenes se han retenido en los primeros años de la construcción de estas estructuras, siendo el aporte de sedimentos a los diques muy bajo en la actualidad gracias a la acción de la vegetación.

Algunos autores como Navarro *et al.* (2014) han hecho ajustes a la ecuación de Verhulst-Pearl para analizar la dinámica de la cubierta vegetal. Esta ecuación se basa en la relación entre la eficiencia potencial (Ω) y la eficiencia temporal (λ):

$$V(t) = \frac{\Omega \cdot V_0 \cdot e^{\lambda t}}{\Omega + V_0 \cdot (e^{\lambda t} - 1)}$$

Donde V es el área de cobertura de vegetación normalizado por la superficie total; V_0 es la cubierta inicial vegetación (en t.p.u); y t es el tiempo transcurrido desde la primera observación. El resultado de su aplicación a la zona de estudio se muestra en la Figura 4.20. Tal y como puede apreciarse, el ajuste tan sólo es bueno para los primeros valores (coeficiente de Nash-Sutcliffe=0,5460 con $\lambda=0,025$) alejándose de la tendencia ofrecida por esta ecuación. Es decir, en este caso el análisis realizado con la ecuación de Verhulst-Pearl no resulta adecuado, tanto considerando la superficie total de estudio como la superficie total afectada por repoblación. En consecuencia, las expresiones que representan la evolución vegetal son las polinómicas, tanto para superficie total como repoblada ($R^2=0,976$). De acuerdo con las Figuras 4.19 y 4.20, el 100% de la superficie repoblada se consigue en unos 60 años, pero que esto solo supone una revegetación del 35% del total del área, lo cual indica que habría que realizar una segunda repoblación para aumentar la protección del bosque, pues según la Tabla 4.42 y las Figuras 4.19 y 4.20 se observa que la reducción del ritmo de revegetación se ha estabilizado en valores muy bajos en los últimos 10 años del

periodo analizado, donde la pendiente entre los puntos consecutivos es mucho menor que, por ejemplo, entre los 30 y 40 años.

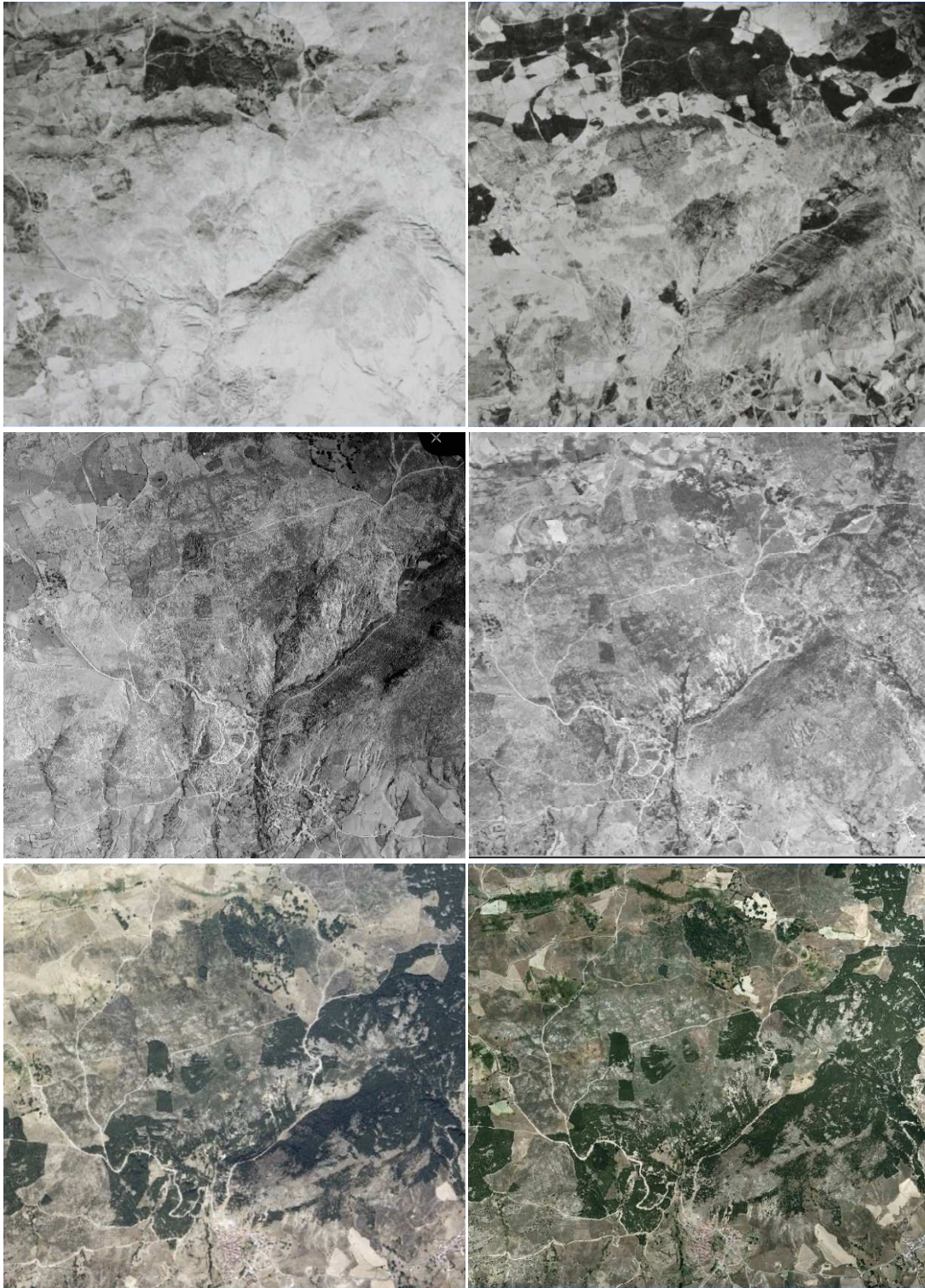


Figura 4.18. Fotografías aéreas que muestran la evolución de la cubierta forestal en el área de la restauración. De izquierda a derecha y de arriba abajo se corresponden con los años 1945, 1957, 1977, 1984, 2002 y 2007. Escala aproximada: 1:10.000. Las fotografías de 1945 y 1957 son del Ejército del Aire; las fotografías de 1977, 1984, 2002 y 2007 son del Instituto Geográfico Nacional.



Tabla 4.41. Superficie cubierta por vegetación forestal (SV, m²) y porcentaje de la superficie cubierta con respecto al área total de la repoblación (SV, %) a lo largo del tiempo

Año	Características de la cobertura arbolada	SV (m ²)	SV (%)
1945	Superficie cubierta total	81.583,79	3,76
	Robledal	81.583,79	3,76
	Superficie repoblada	0,00	0,00
1957	Superficie cubierta total	81.583,79	3,76
	Robledal	81.583,79	3,76
	Superficie repoblada	0,00	0,00
1977	Superficie cubierta total	163.335,49	7,52
	Ribera	16.404,96	0,76
	Robledal	81.583,79	3,76
	Superficie repoblada y cubierta	65.346,75	3,01
	Superficie repoblada no cubierta	573.563,77	26,40
1984	Superficie cubierta total	250.874,69	11,55
	Ribera	16.404,96	0,76
	Robledal	81.583,79	3,76
	Superficie repoblada y cubierta	152.885,94	7,04
	Superficie repoblada no cubierta	486.024,57	22,37
2002	Superficie cubierta total	736.899,26	33,92
	Ribera	16.404,96	0,76
	Robledal	81.583,79	3,76
	Superficie repoblada y cubierta	638.910,51	29,41
	Superficie repoblada no cubierta	0,00	0,00
2007	Superficie cubierta total	736.899,26	33,92
	Ribera	16.404,96	0,76
	Robledal	81.583,79	3,76
	Superficie repoblada y cubierta	638.910,51	29,41
	Superficie repoblada no cubierta	0,00	0,00

Tabla 4.42. Superficie cubierta por vegetación forestal (m²) a lo largo del tiempo y porcentaje de vegetación forestal cubierta para cada año con respecto al área total de la restauración (izquierda) y con respecto al área repoblada (derecha)

Años	SV (m ²)	SV (%)	SV (t.p.u.)	Años	SV (m ²)	SV (%)	SV (t.p.u.)
0 1945	81.583,79	3,76	0,04	0 1945	81.583,79	11,07	0,11
12 1957	81.583,79	3,76	0,04	12 1957	81.583,79	11,07	0,11
32 1977	163.335,49	7,52	0,08	32 1977	163.335,49	22,17	0,22
39 1984	250.874,69	11,55	0,12	39 1984	250.874,69	34,04	0,34
57 2002	736.899,26	33,92	0,34	57 2002	736.899,26	100,00	1,00
62 2007	736.899,26	33,92	0,34	62 2007	736.899,26	100,00	1,00
Superficie total				Superficie repoblada			
2.172.250,83 m ²				736.899,26 m ²			

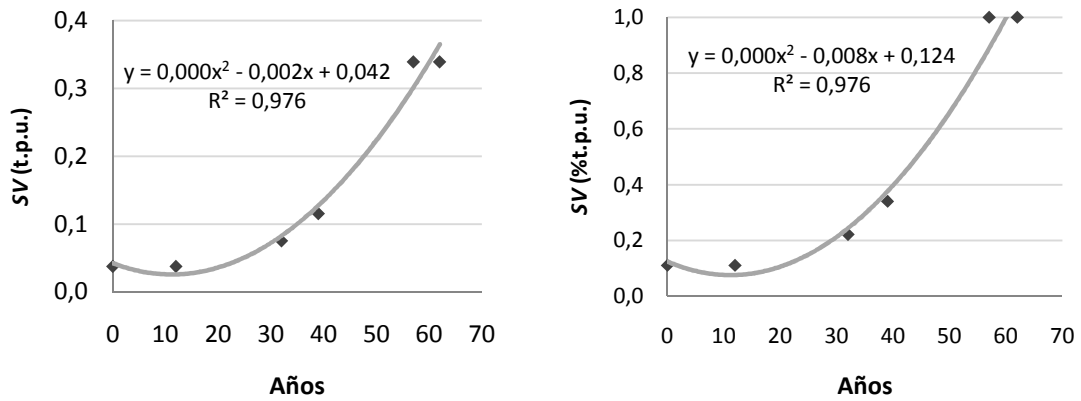


Figura 4.19. Evolución de la superficie cubierta por vegetación forestal (SV) en las cárcavas de Tórtoles a lo largo del tiempo desde 1945 (que en los gráficos se corresponde con el año 0) hasta la actualidad. El gráfico de la izquierda representa el porcentaje de vegetación cubierta (en t.p.u.) respecto al área total de la restauración y el de la derecha respecto al área repoblada

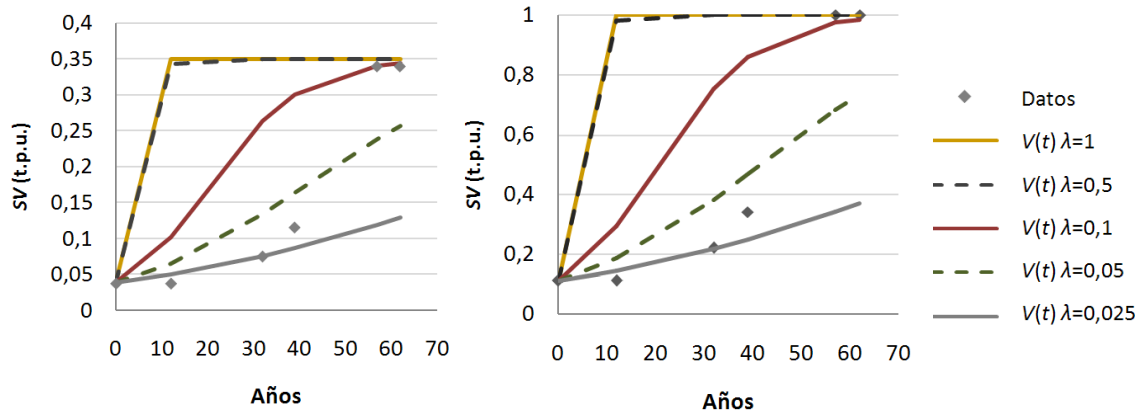


Figura 4.20. Medición y modelado de la recuperación de la vegetación como la relación entre la superficie cubierta por vegetación forestal (SV) y el tiempo transcurrido desde 1945 (que se corresponde con el año 0) en las cárcavas de Tórtoles siguiendo la ecuación de Verhulst-Pearl. En la familia de curvas, el parámetro de eficiencia temporal (λ) varía, de forma que cuanto mayor es el valor λ , más rápida será la respuesta natural. El gráfico de la izquierda representa el porcentaje de vegetación cubierta (en t.p.u.) respecto al área total de la restauración y el de la derecha respecto al área repoblada

4.8. EFICIENCIA DE TRAMPA

La eficiencia de trampa de los diques es esencial para conocer la emisión de los sedimentos no retenidos por estas estructuras aguas abajo de la restauración. Se analizan a continuación los dos modelos planteados para estimar este parámetro. Todos ellos se han calculado siguiendo la fórmula propuesta por Brown & Jarvis (1943), y tomando D igual a 1.



4.8.1. MODELO 1

Se ha obtenido la eficiencia de trampa (TE) de acuerdo con este modelo para los 113 diques a los que se ha podido aplicar la metodología propuesta de estimación del volumen. En los 10 diques restantes no es posible conocer la capacidad de almacenamiento (parámetro de la ecuación de la eficiencia de trampa) ya que no se han podido realizar las mediciones de campo necesarias. Dado que este parámetro (capacidad de almacenamiento) se ha obtenido gracias a la aplicación de cada metodología de estimación del volumen de sedimentos A, B y C, se han obtenido distintos valores de eficiencia de trampa que denominamos TE_{AL} , TE_{B1} y TE_{C1} , respectivamente, todos ellos medidos en %. Los resultados para las tres metodologías de estimación del volumen aplicadas se muestran en la Tabla 4.43. Siguiendo este modelo se obtienen superficies individuales de la cuenca de aportación de sedimentos a cada dique, las cuales se muestran en la Figura 4.21. Hay que añadir a modo de aclaración que en este apartado, las metodologías A, B y C de estimación del volumen de sedimentos se aplican para determinar la capacidad máxima de almacenamiento de cada dique. Por lo tanto no se trata de tres metodologías distintas para estimar la eficiencia de trampa, sino para estimar un parámetro de la ecuación que permite calcular la eficiencia de trampa. La capacidad de almacenamiento de cada dique se estima a partir de estas metodologías para la situación de aterramiento completo del dique, de forma que en aquellos diques aterrados coincide el volumen de sedimentos calculado y su capacidad de almacenamiento.

De acuerdo con las Tablas 4.44 y 4.45, la eficiencia de trampa varía desde el 24,83% hasta el 99,76% si se aplica la metodología A, si bien tanto la media (91,09%) como la mediana (96,21%) toman valores altos. Para las metodologías B y C, si bien los valores máximos son ligeramente superiores a los obtenidos con la metodología A, tanto la media como la mediana de la eficiencia de trampa toman valores menores, en concreto la eficiencia de trampa media es un 4,09% inferior en el caso de la metodología B y un 3,49% inferior en el caso de la metodología C. De acuerdo con los datos de sesgo y curtosis estandarizados (Tabla 4.44) las muestras no siguen un patrón normal, por lo que a efectos de comparación estadística es más adecuado comparar medianas y desviaciones típicas.

La tabla ANOVA (Tabla 4.45) indica que no existen diferencias significativas entre las medias de las tres metodologías para la eficiencia de trampa. No obstante, el análisis de Levene, más fiable en caso de muestras que no siguen normalidad, indica que existen diferencias entre las desviaciones típicas de la metodología propuesta (A) con respecto a las dos restantes (B y C), si se estudian por pares de muestras (Tabla 4.46). La prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 4.47) indica que, además, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. En la Figura 4.22 se puede observar esta diferencia entre las metodologías A y B, y entre las metodologías A y C, confirmando lo indicado en la prueba de Levene. De nuevo, un cambio de variable para conseguir normalidad en los datos no ofrece resultados discordantes con los expuestos, por lo que se opta por trabajar con los datos originales.



Tabla 4.43. Eficiencia de trampa de los diques (%) de acuerdo con el modelo 1 y por aplicación de las metodologías A (TE_{A1}), B (TE_{B1}) y C (TE_{C1}), en %

Dique	TE_{A1} (%)	TE_{B1} (%)	TE_{C1} (%)	Dique	TE_{A1} (%)	TE_{B1} (%)	TE_{C1} (%)	Dique	TE_{A1} (%)	TE_{B1} (%)	TE_{C1} (%)
1	97,66	96,31	97,67	41	91,93	86,31	86,91	84	96,35	92,02	93,76
2	97,99	94,20	97,06	42	90,76	80,23	82,67	85	84,29	78,05	86,84
3	24,83	18,71	22,79	43	92,65	89,62	91,58	87	98,95	98,29	97,92
4	63,21	52,44	57,85	44	95,08	92,94	92,27	88	99,01	98,48	98,86
5	95,99	94,77	94,05	45	98,97	98,81	98,59	89	92,24	83,43	86,61
6	84,51	74,22	72,94	46	95,00	94,98	97,91	90	98,45	97,90	97,43
7	81,30	78,04	71,73	47	99,59	99,34	99,38	91	70,48	55,06	62,03
8	61,94	44,44	41,86	48	97,86	93,70	92,72	92	98,55	98,14	98,18
9	44,50	28,88	34,02	49	99,50	99,23	99,42	93	96,42	95,50	96,88
10	48,55	30,24	31,33	50	92,24	88,05	90,24	94	91,31	84,02	87,35
11	66,19	52,96	58,84	51	98,96	98,86	98,75	95	96,90	95,56	95,15
12	82,11	71,06	72,37	52	98,24	98,16	97,80	96	79,37	56,68	57,62
13	78,27	72,18	72,18	54	75,63	57,88	63,12	97	96,10	91,10	89,77
14	96,76	94,00	89,06	55	91,94	81,10	89,91	98	91,24	93,96	95,01
15	96,21	93,73	93,19	56	93,29	88,37	88,56	99	93,70	92,45	84,97
16	97,23	93,54	96,21	57	98,62	98,28	98,48	100	92,06	91,61	89,61
17	99,47	97,56	98,03	59	45,03	22,79	27,26	102	98,21	96,85	90,59
18	97,41	94,59	92,94	61	98,68	97,79	97,84	103	87,04	82,32	86,96
19	99,40	99,03	99,14	62	99,57	99,51	99,64	104	98,67	98,51	97,91
20	97,26	96,95	96,89	63	95,73	95,77	91,52	105	98,96	98,72	99,12
21	99,61	98,91	98,94	64	98,23	94,92	96,02	106	94,48	93,90	93,42
22	99,14	97,87	97,71	65	97,36	96,53	96,60	107	93,15	91,57	92,35
23	99,08	98,09	98,44	66	69,49	58,72	54,45	108	82,26	63,42	57,62
24	99,18	98,62	98,35	67	96,27	93,51	92,99	109	98,00	97,24	97,24
25	97,90	97,68	97,78	68	98,85	98,66	98,07	110	98,83	98,85	98,28
27	99,76	99,79	99,86	69	97,87	94,52	92,61	111	94,23	94,59	92,93
28	99,37	99,37	98,71	70	96,96	96,50	97,38	112	95,79	96,32	96,83
29	93,22	94,70	95,79	71	93,23	90,84	90,12	113	99,26	98,21	98,59
30	98,74	98,83	98,98	72	98,59	97,46	97,66	114	97,67	95,94	96,67
32	67,38	81,91	87,03	74	90,92	79,00	86,91	116	96,83	94,79	96,83
33	99,73	99,61	99,63	75	94,88	93,79	94,31	117	97,21	96,04	94,67
34	98,96	98,79	97,94	76	91,02	86,79	84,75	118	94,66	90,75	91,06
35	99,35	98,56	98,57	78	90,02	83,75	80,11	119	93,29	87,05	87,83
36	99,48	99,34	99,43	79	78,02	71,11	70,28	120	90,37	86,21	89,29
37	98,75	98,52	98,90	80	94,73	93,26	91,83	121	95,39	94,04	91,48
38	69,81	58,06	70,35	81	98,91	97,67	97,39	122	94,01	93,74	91,26
39	98,44	98,17	97,48	82	97,16	94,23	95,61	123	90,90	85,03	86,65
40	93,32	86,78	91,76	83	74,59	70,85	70,51	MEDIA	91,09	87,36	87,91



Figura 4.21. Cuencas de aportación de los diques de acuerdo con el modelo 1 de eficiencia de trampa



Tabla 4.44. Estadística descriptiva de la eficiencia de trampa de los diques (%), de acuerdo con el modelo 1 y obtenida de la aplicación de la metodología propuesta (TE_{A1}), de la metodología de Castillo *et al.* (2007) (TE_{B1}) y de la metodología de Romero *et al.* (2007a) (TE_{C1})

	TE_{A1} (%)	TE_{B1} (%)	TE_{C1} (%)
Media aritmética	91,09	87,36	87,91
Mediana	96,21	94,20	93,42
Desviación típica	13,13	17,18	16,33
Varianza	172,31	295,17	266,67
Coefficiente de Variación (%)	14,41	19,67	18,58
Mínimo	24,83	18,71	22,79
Máximo	99,76	99,79	99,86
Rango	74,93	81,08	77,07
Sesgo Estandarizado	-11,57	-9,71	-9,85
Curtosis	7,96	4,89	5,01
Curtosis Estandarizada	17,27	10,60	10,87

Tabla 4.45. Tabla ANOVA para el análisis de la eficiencia de trampa (TE)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	916,29	2	458,145	1,8700	0,1554
Intra grupos	82.222,6	336	244,71		
Total (Corr.)	83.138,9	338			

Tabla 4.46. Prueba de Levene para el análisis de la eficiencia de trampa (TE)

Prueba	P-valor
2,7232	0,0671

Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-Valor
TE_A / TE_B	13,1266	17,1803	0,5838	0,0047
TE_A / TE_C	13,1266	16,3298	0,6462	0,0216
TE_B / TE_C	17,1803	16,3298	1,1069	0,5920

Tabla 4.47. Prueba de Kruskal-Wallis para el análisis de la eficiencia de trampa (TE)

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
TE_A	113	188,76
TE_B	113	160,64
TE_C	113	160,61

Estadístico = 6,2085 P-valor = 0,0449

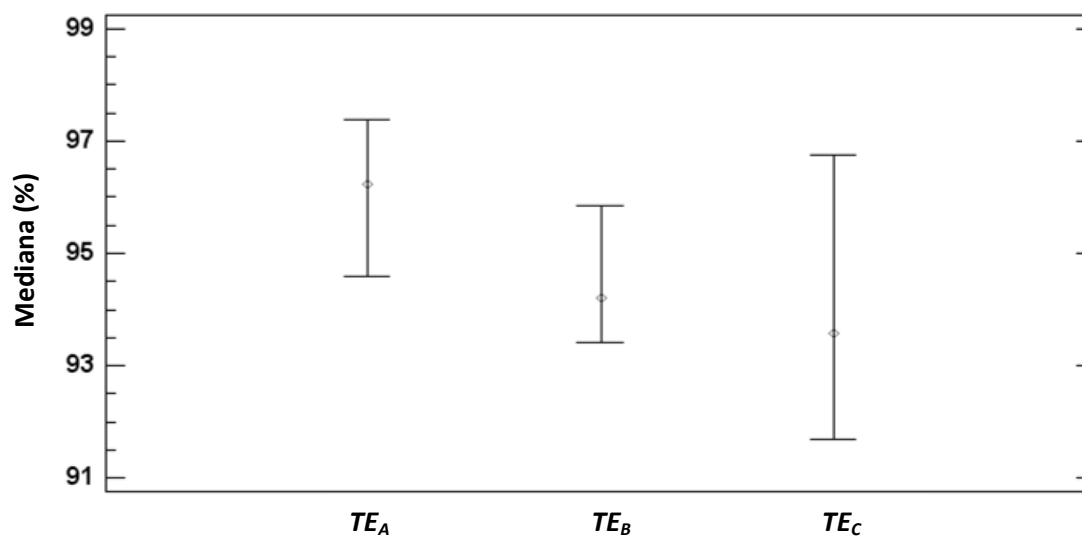


Figura 4.22. Gráfico de medianas con intervalos del 95,0 % de confianza para la eficiencia de trampa (TE)

El resultado de la tasa de emisión de sedimentos obtenido por la aplicación de este modelo es válido para su aplicación a diques individuales, de forma que permite ofrecer una tasa media de emisión por dique. No obstante hay que tener en cuenta que con el modelo 1 de eficiencia de trampa los sedimentos no retenidos por un dique serán recogidos por el dique ubicado inmediatamente aguas abajo de éste, y así ocurrirá sucesivamente con todos los diques que se encuentren relacionados por estar ubicados en una misma cárcava o en cárcavas conectadas, por lo que esas emisiones individuales podrán ser retenidas nuevamente. Es decir, este modelo no ofrece un valor total de emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración.

Por lo tanto, para dar un valor global de emisión de sedimentos (SE) y de tasa total de erosión (TSY) este modelo no es válido, pero sí lo será para dar valores medios por dique, considerando cada estructura de forma individual e independiente.

4.8.2. MODELO 2

Con la aplicación de este modelo se obtienen 13 cuencas de aportación a otros tantos diques ficticios (aquellos ubicados aguas abajo de cada cárcava, en el lugar en el que se encuentra el último dique, y que recogen los sedimentos que reciben por todos los diques de esa cárcava), que engloban el total de la superficie de aportación de sedimentos a los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtolas. En la Figura 4.23 se indica la localización de estas cuencas de aportación y su extensión, y en la Tabla 4.48 se muestran sus superficies (SF) y la eficiencia de trampa de estos diques ficticios para cada metodología de estimación del volumen (TE_{A2} , TE_{B2} y TE_{C2}), cuya ubicación se corresponde con el número de dique que se indica, y en la Tabla 4.49 se muestra la estadística descriptiva de cada variable.

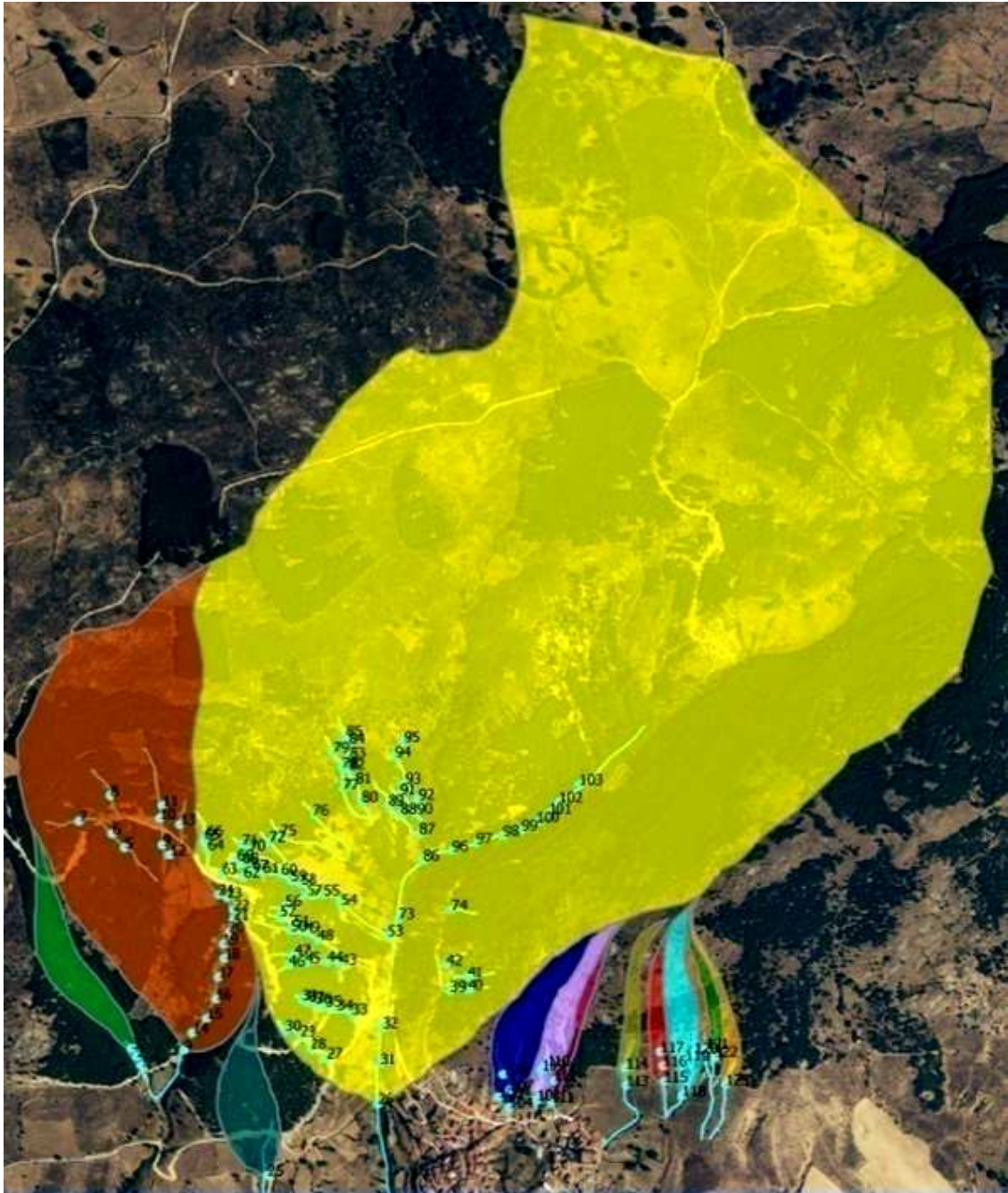


Figura 4.23. Cuencas de aportación de los diques de acuerdo con el modelo 2 de eficiencia de trampa

De acuerdo con el modelo 2 la eficiencia de trampa toma un valor medio del 92,12% de acuerdo con la metodología propuesta, siendo este valor un 3,62% inferior con la metodología B y un 2,62% inferior con la metodología C (Tabla 4.50). Estos valores son superiores en el modelo 2 que en modelo 1, en concreto un 1,13% superior TE_{A2} que TE_{A1} , un 1,63% superior TE_{B2} que TE_{B1} , y un 2,05% superior TE_{C2} que TE_{C1} . En la Figura 4.24 se muestran los valores de TE_2 para cada metodología y para cada dique ficticio generado por el modelo 2. Se puede observar que en 12 de los 13 diques se obtienen valores superiores de eficiencia de trampa por aplicación de la metodología propuesta en este trabajo para la estimación del volumen (A).



Tabla 4.48. Superficie de aportación (SF , m^2) y eficiencia de trampa (TE , %) de los diques ficticios del modelo 2, obtenida por aplicación de las metodologías de estimación del volumen A, B y C (TE_{A2} , TE_{B2} y TE_{C2} , respectivamente, en %)

Dique	SF (m^2)	TE_{A2} (%)	TE_{B2} (%)	TE_{C2} (%)
F1	20.831,89	65,33	47,57	60,48
F4	218.139,21	88,04	78,84	79,14
F25	21.662,08	97,90	97,68	97,78
F26	1.827.722,94	86,17	81,18	82,58
F104	21.269,90	96,23	95,56	95,60
F108	12.837,85	95,12	94,42	92,23
F111	5.015,80	95,07	95,56	95,49
F113	8.025,29	98,16	96,49	97,15
F115	7.148,16	96,50	94,94	94,15
F118	15.058,66	93,09	87,75	88,93
F121	3.384,99	95,39	94,04	91,48
F122	4.875,78	94,01	93,74	91,26
F123	6.278,28	90,90	85,03	86,65

Tabla 4.49. Estadística descriptiva de la superficie de aportación SF (m^2) y eficiencia de trampa (TE , %) de los diques ficticios del modelo 2, obtenida de la aplicación de las metodologías de estimación del volumen A, B y C (TE_{A2} , TE_{B2} y TE_{C2} , respectivamente, en %)

	SF (m^2)	TE_{A2} (%)	TE_{B2} (%)	TE_{C2} (%)
Media aritmética	11.924,05	92,12	88,78	89,71
Mediana	10.431,57	95,10	94,23	91,86
Desviación típica	7.375,46	9,65	15,01	10,88
Varianza	54.397.461,70	93,19	225,28	118,29
Coefficiente de variación	0,62	0,10	0,17	0,12
Mínimo	3.384,99	65,33	47,57	60,48
Máximo	21.662,08	98,16	97,68	97,78
Rango	18.277,10	32,82	50,11	37,30
Sesgo estandarizado	0,42	-3,72	-3,60	-3,29
Curtosis	-1,81	8,67	8,13	7,19
Curtosis estandarizada	-1,17	5,60	5,25	4,64

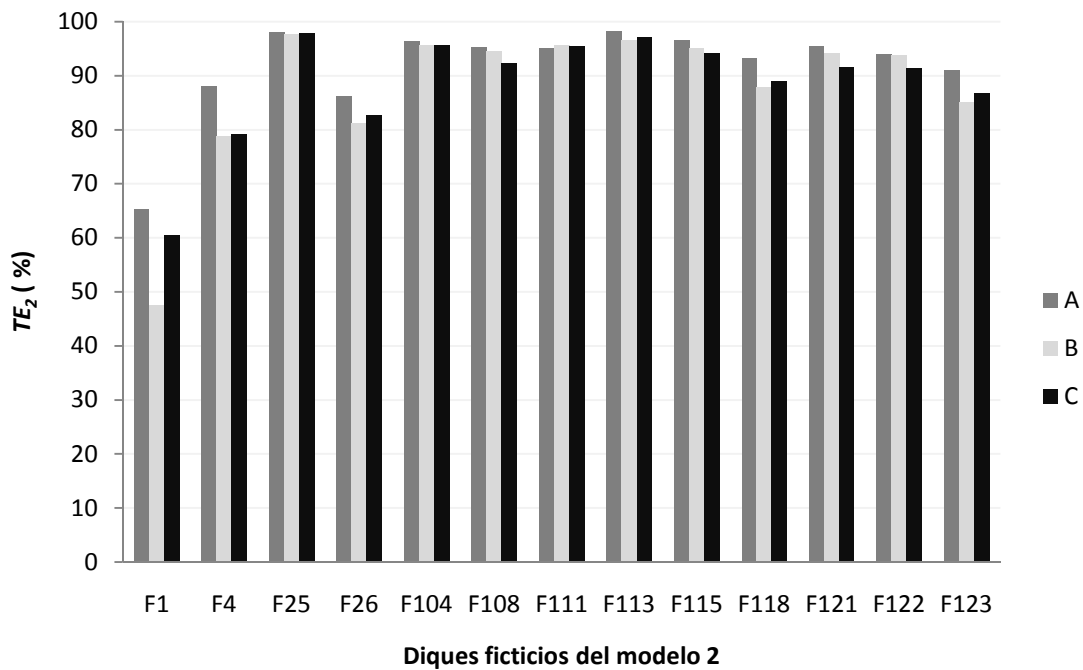


Figura 4.24. Eficiencia de trampa obtenida con las metodologías A, B y C de estimación del volumen, para los diques ficticios del modelo 2 de eficiencia de trampa (TE_2 , %)

Tanto el sesgo como la curtosis estandarizados indican que no existe normalidad en la muestra, por lo que se ha aplicado la prueba de Kruskal-Wallis, que determina si existen diferencias significativas entre las medianas. Puesto que el P-valor es mayor que 0,05 (Tabla 4.50), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.50. Prueba de Kruskal-Wallis para el análisis de la eficiencia de trampa del modelo 2 (TE_2 , %)

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
TE_{A2}	10	17,4
TE_{B2}	10	15,0
TE_{C2}	10	14,1

Estadístico = 0,7511 P-valor = 0,6869

Además se ha aplicado la prueba de Levene, que evalúa la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de las 3 muestras de TE para el modelo 2 son iguales (Tabla 4.51). Puesto que el P-valor es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. Como los P-valores no están por debajo de 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la desviación estándar de cada par de muestras, con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 4.51. Prueba de Levene para el análisis de la eficiencia de trampa del modelo 2 (TE_2 , %)

Prueba		P-valor		
	0,3985			0,6752
Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-valor
TE_A / TE_B	9,6545	15,0113	0,4136	0,2046
TE_A / TE_C	9,6545	10,8772	0,7878	0,7282
TE_B / TE_C	15,0113	10,8772	1,9046	0,3512

4.8.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La medición de la eficiencia de trampa para estimar la emisión de sedimentos ha sido realizada por diversos autores desde hace décadas. Uno de los primeros autores en estudiar esta variable es Brune (1953), que ofrece unas curvas que relacionan la eficiencia de trampa de un embalse, dique o estructura de retención con su capacidad de almacenamiento (Figura 4.25). Las curvas de Brune (1953) ofrecen un valor de eficiencia de trampa media del 57%, de forma que cuanto mayor es la capacidad del embalse mayor es la eficiencia (TE).

En cuanto a la medición o estimación de esta variable, algunos autores, como Verstraeten & Poesen (2001), han realizado estudios experimentales para medir la eficiencia de trampa; otros, como Bussi *et al.* (2013) plantean modelos para su estimación; y más abundantes son los estudios en los que se realiza la estimación de esta variable a partir de fórmulas aceptadas por la comunidad científica, en concreto la fórmula propuesta por Brown & Jarvis (1943), aplicada asimismo en este trabajo.

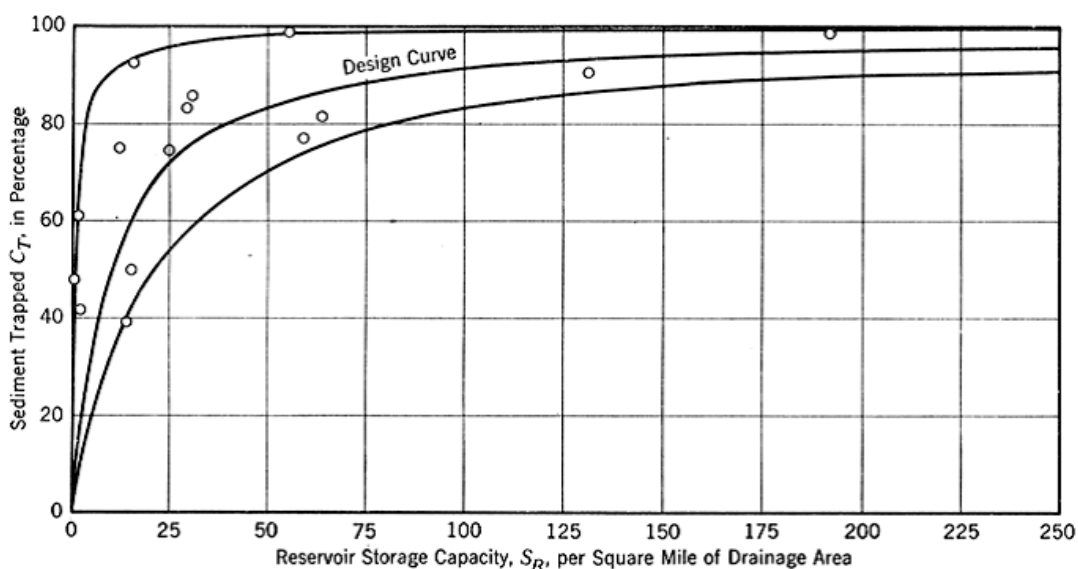


Figura 4.25. Relación entre la eficiencia de trampa (C_T , %) y la capacidad de almacenamiento (S_R , sq mi) (Brune, 1953)



Verstraeten & Poesen (2001) realizan estudios experimentales de simulación, en los que obtienen una eficiencia de trampa que varía del 73,6 al 93,1%, con una media del 80,2%, a partir de 8 mediciones. Por su parte, Bussi *et al.* (2013) desarrollan el modelo STEP (*Sediment Trap Efficiency for Small Ponds*), aplicable a pequeños embalses o estanques, sistemas cuya finalidad es la retención de agua, y obtienen valores de eficiencia de trampa que varían del 29 al 100%, con una media del 51%.

En cuanto a los autores que aplican la ecuación propuesta por Brown & Jarvis (1943) para estimar la eficiencia de trampa, Boix-Fayos *et al.* (2008) analizan el efecto en la retención de sedimentos de los 58 diques de mampostería construidos en la cuenca de la Rogativa (Murcia), y obtienen un rango de eficiencia de trampa que varía del 10,46 al 99,61%, con una media del 68,64%, empleando en la fórmula un valor de D igual a 0,76. Los valores más bajos que obtienen se corresponden con los diques aterrados y con aquellos que poseen poca capacidad de almacenamiento para una superficie de aportación pequeña. Por su parte, Bellín *et al.* (2011) centran su estudio en 36 diques estudiados ubicados en la Sierra de los Filabres y Alhamilla y en la Sierra de las Estancias (Almería). Estos autores emplean un valor de D igual a 1 y obtienen valores con un rango amplio que varía del 7 al 99%, con una eficiencia de trampa media del 72,25%. De acuerdo con su estudio, en los diques de gaviones la eficiencia de trampa media desciende al 67%. Romero *et al.* (2012) realizan la medición de 18 diques en la cuenca del río Quípar y consideran valores de D comprendidos entre 0,046 y 1. Con D igual a 1 los valores de eficiencia de trampa que obtienen varían del 33,9% al 98,7%. En este caso los menores valores se corresponden con diques de hormigón, en los que la eficiencia de trampa media es del 67,8%, mientras que los diques de gaviones la eficiencia de trampa media es del 91,1%, resultados muy similares a los obtenidos en este estudio y cercanos a los obtenidos por Verstraeten & Poesen (2001) en estudios experimentales de simulación. Por su parte, Ramos (2014) aplica la ecuación propuesta por Brown & Jarvis (1943) para estimar la eficiencia de trampa de 25 diques de gaviones construidos en la cuenca del río Carrión (Palencia) y obtiene un valor medio de eficiencia del 97,70%, con un rango muy reducido que varía del 93,02% al 99,78%. En la restauración de Tórtoles, de acuerdo con este trabajo, los valores de eficiencia de trampa varían del 24,83 al 99,76%, con un valor medio del 91,09% siguiendo el modelo de eficiencia de trampa 1 (diques individuales) y a partir de la medición de 113 diques. Este modelo es el seguido por los autores indicados ya que en sus estudios los diques analizados no se encontraban conectados, o bien no indicaban si tenían en cuenta esta circunstancia. Sin embargo, el modelo 2 de TE planteado en este trabajo considera el efecto global de las cárcavas, y no el de cada dique individual, por lo que se considera el más adecuado para dar un valor global de emisión de sedimentos (SE) y de tasa total de erosión (TSY). Con este modelo el rango de eficiencia de trampa no es tan amplio como el obtenido con el modelo 1, variando del 63,33 al 98,16%, con un valor medio del 92,12%, siendo 13 los diques ficticios analizados, que incluyen 113 diques reales. Por tanto, la eficiencia de trampa es mayor en los diques de Tórtoles que en el resto de estudios revisados realizados en otras zonas, a excepción del trabajo realizado en la cuenca del río Carrión, que obtienen valores algo superiores (aplican la metodología empleada en este trabajo para la medición del volumen de sedimentos (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b), si bien se obtienen valores muy cercanos a los



obtenidos por Romero *et al.* (2012) en la cuenca del río Quípar. Esto quiere decir que los valores de emisión de sedimentos y por tanto de erosión total que se extraen de este estudio son menores que los que obtienen el resto de autores excepto Ramos (2014), ya que la eficiencia de trampa y la tasa de emisión de sedimentos son inversamente proporcionales.

4.9. TASA DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS

Aplicando la eficiencia de trampa a los datos obtenidos sobre la erosión retenida en los diques forestales se obtiene la tasa de emisión de sedimentos, que se corresponde con la parte de los sedimentos que no quedan retenidos en los diques. Los resultados de su cálculo de acuerdo con el modelo 1 de eficiencia de trampa para los 113 diques estudiados se muestran en la Tabla 4.52.

La emisión media de sedimentos es de $0,096 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, de acuerdo con la metodología propuesta en este trabajo para la estimación del volumen, ligeramente inferior que con las otras metodologías (Tabla 4.53). En este caso las muestras siguen normalidad (Tabla 4.53). La tabla ANOVA (Tabla 4.54) muestra diferencias significativas entre las medias de tasas de emisión de sedimentos obtenidas con las metodologías A, B y C, con un 95,0% de confianza, por lo que se realiza la prueba de rangos múltiples, que permite determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. En concreto, esta prueba (Tabla 4.55) indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la tasa de emisión de sedimentos SE_A y la tasa SE_B , y entre las medias de la tasa de emisión de sedimentos SE_A y la tasa SE_C . Es decir, la metodología propuesta en este trabajo para la estimación del volumen de sedimentos ofrece resultados significativamente diferentes entre la tasa media de emisión de sedimentos con respecto a las metodologías B y C, propuestas por otros autores, y así queda patente en la Figura 4.26.

Por su parte, la prueba de Levene indica que existen diferencias significativas entre las desviaciones típicas de las tasas de emisión de sedimentos SE_A , SE_B y SE_C (Tabla 4.56). En concreto se observan diferencias en las desviaciones típicas de las tasas de emisión obtenidas por las metodologías de estimación del volumen A y B, pero no entre las metodologías A y C.

Por último, de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 4.57), puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.



Tabla 4.52. Tasa de emisión de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) de acuerdo con la metodología propuesta (SE_A), con la metodología B (SE_B) y con la metodología C (SE_C)

Dique	SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Dique	SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Dique	SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
1	0,082	0,092	0,092	41	0,057	0,097	0,097	84	0,125	0,149	0,149
2	0,031	0,053	0,053	42	0,043	0,076	0,076	85	0,189	0,189	0,189
3	0,108	0,130	0,130	43	0,094	0,117	0,117	87	0,136	0,136	0,136
4	0,090	0,113	0,113	44	0,089	0,119	0,119	88	0,128	0,128	0,128
5	0,086	0,089	0,089	45	0,099	0,125	0,125	89	0,067	0,097	0,097
6	0,075	0,103	0,103	46	0,095	0,101	0,101	90	0,081	0,104	0,104
7	0,053	0,080	0,080	47	0,118	0,123	0,123	91	0,072	0,069	0,089
8	0,054	0,062	0,062	48	0,039	0,108	0,108	92	0,116	0,125	0,125
9	0,078	0,104	0,104	49	0,121	0,142	0,142	93	0,139	0,139	0,139
10	0,017	0,039	0,039	50	0,128	0,128	0,128	94	0,132	0,132	0,132
11	0,080	0,105	0,105	51	0,138	0,138	0,138	95	0,100	0,122	0,122
12	0,017	0,036	0,036	52	0,120	0,136	0,136	96	0,043	0,066	0,066
13	0,068	0,096	0,096	54	0,019	0,039	0,039	97	0,005	0,020	0,020
14	0,040	0,078	0,078	55	0,108	0,108	0,108	98	0,063	0,086	0,086
15	0,071	0,094	0,094	56	0,147	0,147	0,147	99	0,048	0,082	0,082
16	0,070	0,101	0,101	57	0,136	0,136	0,136	100	0,072	0,085	0,085
17	0,066	0,111	0,111	59	0,024	0,051	0,031	102	0,096	0,123	0,123
18	0,045	0,080	0,080	61	0,043	0,063	0,063	103	0,129	0,129	0,129
19	0,043	0,074	0,074	62	0,065	0,072	0,072	104	0,132	0,132	0,132
20	0,106	0,125	0,125	63	0,145	0,073	0,192	105	0,137	0,137	0,137
21	0,047	0,049	0,049	64	0,049	0,052	0,052	106	0,149	0,149	0,149
22	0,037	0,062	0,062	65	0,159	0,088	0,088	107	0,149	0,149	0,149
23	0,033	0,046	0,046	66	0,021	0,073	0,063	108	0,101	0,192	0,192
24	0,061	0,075	0,075	67	0,051	0,082	0,082	109	0,122	0,122	0,122
25	0,164	0,164	0,164	68	0,131	0,131	0,131	110	0,133	0,133	0,133
27	0,143	0,143	0,143	69	0,082	0,102	0,102	111	0,128	0,128	0,128
28	0,205	0,205	0,205	70	0,123	0,123	0,123	112	0,141	0,141	0,141
29	0,145	0,145	0,145	71	0,105	0,119	0,119	113	0,072	0,101	0,101
30	0,126	0,126	0,126	72	0,128	0,128	0,128	114	0,142	0,142	0,142
32	0,155	0,155	0,155	74	0,037	0,060	0,060	116	0,129	0,139	0,139
33	0,133	0,144	0,144	75	0,129	0,129	0,129	117	0,072	0,101	0,101
34	0,157	0,157	0,157	76	0,128	0,128	0,128	118	0,041	0,075	0,075
35	0,156	0,156	0,156	78	0,127	0,127	0,127	119	0,069	0,108	0,108
36	0,153	0,153	0,153	79	0,175	0,192	0,192	120	0,112	0,134	0,134
37	0,079	0,105	0,105	80	0,124	0,144	0,144	121	0,068	0,128	0,128
38	0,144	0,144	0,144	81	0,048	0,100	0,100	122	0,116	0,135	0,135
39	0,060	0,079	0,079	82	0,100	0,127	0,127	123	0,053	0,081	0,081
40	0,075	0,103	0,103	83	0,113	0,124	0,124	MEDIA	0,096	0,111	0,112

Tabla 4.53. Estadística descriptiva de las tasas de emisión de sedimentos SE_A , SE_B y SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

	SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
Media aritmética	0,096	0,111	0,112
Mediana	0,099	0,119	0,119
Desviación típica	0,043	0,036	0,037
Varianza	0,002	0,001	0,001
Coefficiente de Variación (%)	45,38	32,21	32,74
Mínimo	0,005	0,020	0,020
Máximo	0,205	0,205	0,205
Rango	0,199	0,185	0,185
Sesgo Estandarizado	-0,043	-0,522	-0,592
Curtosis	-0,850	-0,040	-0,044
Curtosis Estandarizada	-1,844	-0,086	0,096

Tabla 4.54. Tabla ANOVA para el análisis de la tasa de emisión de sedimentos (SE , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	0,0180	2	0,0090	6,02	0,0027
Intra grupos	0,5029	336	0,0015		
Total (Corr.)	0,5210	338			

Tabla 4.55. Prueba de rangos múltiples de la tasa de emisión de sedimentos (SE , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	113	0,0957	X
SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	113	0,1106	X
SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	113	0,1116	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) - SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	*	-0,0149	0,0101
SE_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) - SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	*	-0,0159	0,0101
SE_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) - SE_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)		-0,0010	0,0101

* indica una diferencia significativa.

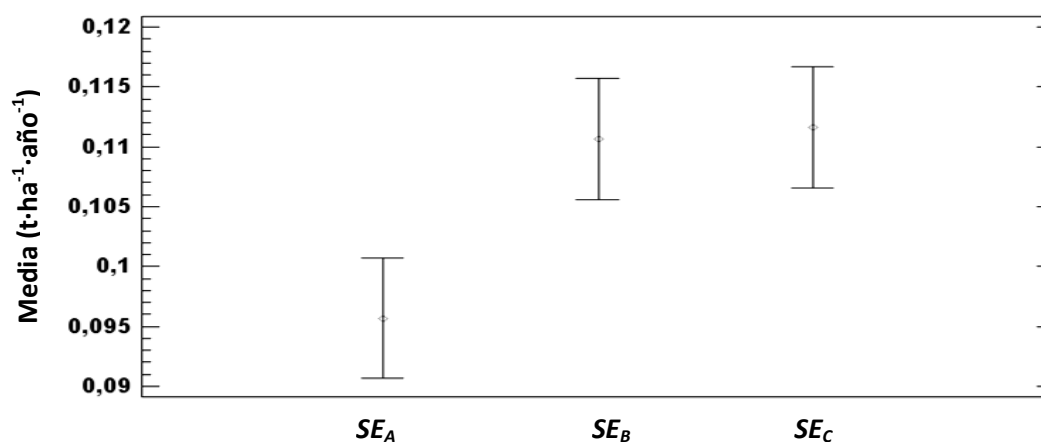
Figura 4.26. Comparación de las tasas medias de emisión de sedimentos, obtenidas por aplicación de las metodologías A, B y C (SE_A , SE_B y SE_C , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), e intervalo LSD de Fisher (95,0% de confianza)



Tabla 4.56. Prueba de Levene para el análisis de la tasa de emisión de sedimentos ($SE, t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

Prueba		P-Valor		
		5,7674	0,0034	

Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-Valor
SE_A / SE_B	0,0434	0,0356	1,4847	0,0376
SE_A / SE_C	0,0434	0,0365	1,4121	0,0692
SE_B / SE_C	0,0356	0,0365	0,9511	0,7913

Tabla 4.57. Prueba de Kruskal-Wallis para la tasa de emisión de sedimentos ($SE, t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
$SE_A (t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1})$	113	147,42
$SE_B (t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1})$	113	180,13
$SE_C (t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1})$	113	182,45

Estadístico = 9,0327 Valor-P = 0,0109

Existen evidencias de que con anterioridad al proyecto de restauración hidrológico-forestal había problemas de emisión de sedimentos. Así, Azcarretazábal escribió en 1964 que *"Está la zona que nos ocupa despoblada de vegetación arbórea existiendo solamente matorral y erosiones frecuentes que proporcionan gran cantidad de arrastres que a través del Corneja van al río Tormes, aguas arriba del Pantano de Santa Teresa en la provincia de Salamanca"* y que *"Aguas abajo de esta confluencia (se refiere a la confluencia del Corneja con el Tormes), en el término de La Maya se encuentra la presa del Pantano de Santa Teresa al que van a parar gran parte de los arrastres de las erosiones de la cabecera de este río, con perjuicio para el mismo embalse y para los grandes regadíos que más abajo existen o se están creando"*. Estas palabras enfatizan los problemas generados en la zona a causa de la degradación de la tierra y los sólidos en suspensión en las aguas corrientes (Díaz *et al.*, 2014a, 2014b).

Por otra parte, el río Corneja está clasificado como tramo truchero, con presencia de *Salmo trutta morpha fario*. De acuerdo con la actual Ley de Pesca de Castilla y León (Ley 9/2013, de 3 de diciembre) tendrán la consideración de aguas trucheras "las que así sean declaradas por la consejería competente en materia de pesca por ser la trucha común la especie pescable de mayor interés, o por su elevada potencialidad para albergar a dicha especie". Además, esta Ley de Pesca declara a la trucha común (*Salmo trutta*) como Especie de Interés Preferente en Castilla y León, reconociendo de forma expresa su importancia ecológica y deportiva, y reafirma la prohibición de comercialización de esta especie. La Directiva Europea Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) (UE, 2000) impone un límite máximo de sólidos en suspensión para las aguas de salmónidos igual a $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sólidos en suspensión. El motivo de la imposición de límites máximos para estas especies es el impacto tan negativo que ejercen sobre sus poblaciones y sobre sus hábitats; de hecho, la concentración de finos es un factor crítico en el desarrollo embrionario de los salmónidos (Wood & Armitage, 1997). Por tanto, se puede afirmar que si no existiera la actual red de diques y si no se hubiera recuperado la cubierta forestal (tanto en Tórtoles como en el resto de la cuenca alta del Corneja) una gran cantidad de sólidos en suspensión descargaría en el



río Corneja y las poblaciones de truchas podrían sufrir lesiones graves e incluso una reducción drástica de su población. Es importante añadir que existe veda total en el río Corneja desde su nacimiento hasta el azud de la regadera situado aguas abajo del puente de la N-110 (en el límite de los términos municipales de Bonilla de la Sierra y San Miguel de Corneja (Orden FYM/991/2013, de 27 de noviembre, por la que se establece la Normativa Anual de Pesca de la Comunidad de Castilla y León para el año 2014)), medida que se toma con el propósito de que las poblaciones mermadas de esta especie puedan recuperarse.

La tasa de emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración de Tórtoles, teniendo en cuenta el periodo completo de años desde la construcción de los diques, es muy baja, lo cual implica que gracias a las actuaciones de la Confederación Hidrográfica del Duero se han conseguido minimizar los efectos negativos de la producción de sedimentos y su llegada al río, que tendrán influencia sobre el estado de la fauna piscícola del río Corneja así como sobre el aterramiento de embalses. En concreto, en la Figura 4.27 se muestra el % de sedimentos retenidos con respecto al % de sedimentos emitidos aguas abajo de la restauración. Como se puede observar, en la mayoría de los casos el porcentaje de sedimentos emitidos es muy bajo con respecto a la retención, en concreto la emisión media es del 8,91% y la retención de sedimentos se corresponde con una media del 91,09%, lo cual es un indicador más del efecto positivo de estas actuaciones.

Existen dos estaciones que ofrecen datos para analizar la calidad del agua y el estado del ecosistema de ribera de la zona de estudio, ambas propiedad de la Confederación Hidrográfica del Duero y son, de aguas arriba a aguas abajo: la estación Puente del Congosto y la estación de calidad del Embalse de Santa Teresa (ubicada en el embalse del mismo nombre). Se encuentran en el río Tormes y los datos que proporcionan se refieren en concreto a un tramo que discurre aguas abajo de la zona de estudio y de la confluencia del río Corneja con el río Tormes.

Los registros de la estación de control de la calidad del agua ubicada en Puente del Congosto (CHD, 2013) indican que la concentración de sólidos en suspensión para el periodo 1999-2010 es de $4,49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con un rango de variabilidad de $1,97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a $18,20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, por lo que se encuentra por debajo del umbral de $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ impuesto por la Directiva Europea Marco del Agua (UE, 2000) para los tramos de poblaciones de salmonidos.

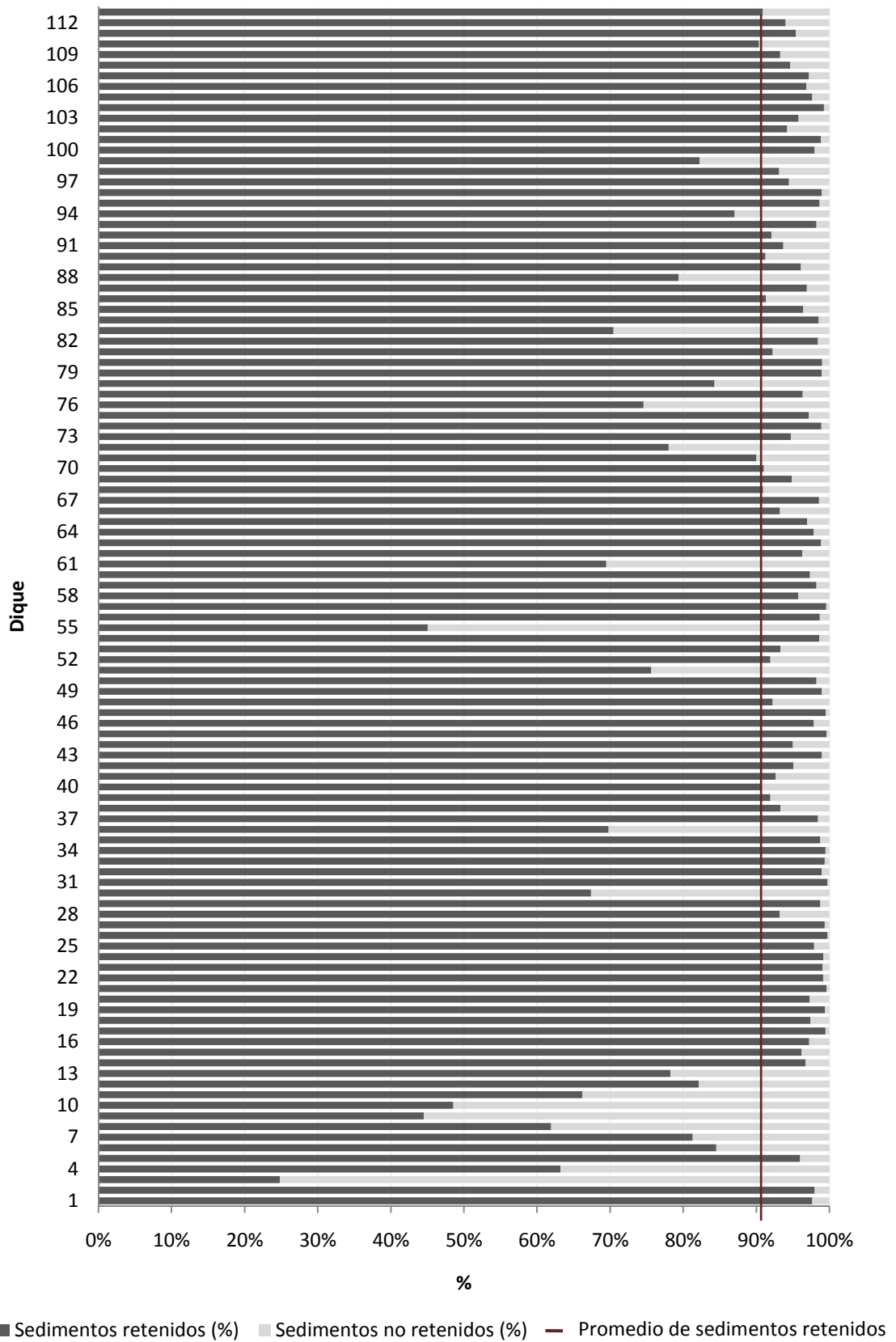


Figura 4.27. Porcentaje de sedimentos retenidos por los diques y % de sedimentos emitidos aguas abajo de la restauración

Por su parte, el embalse de Santa Teresa es utilizado para producción de energía eléctrica, suministro de agua, riego, y actividades industriales, pesqueras y de recreo (CHD, 2013), usos para los cuáles la calidad del agua es muy importante, así como la realización de trabajos de retención de sedimentos aguas arriba, por lo que obras como las realizadas en Tórtoles son especialmente necesarias. De acuerdo con el estudio realizado, los diques de Tórtoles han retenido un total de 8.408,74 t de sedimentos ($6.194,95 \text{ m}^3$) a lo largo de 48 años ($129,06 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$), y tan sólo han sido emitidos aguas abajo 631,11 t de sedimentos ($465,28 \text{ m}^3$), lo que a lo largo de los 48 años desde que se llevó a cabo el proyecto de restauración supone una media de $9,69 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$. Teniendo en cuenta que la capacidad del embalse es de 496 hm^3 , la masa de sedimentos retenidos en los diques de Tórtoles, si se encontrasen en este volumen de agua equivaldría a una concentración de sólidos en suspensión de $16,95 \text{ mg L}^{-1}$. De acuerdo con la estación de control del Embalse de Santa Teresa, la concentración de sólidos en suspensión para el periodo del que se dispone de datos (1999-2010) en este tramo del río es de $10,7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, con un rango que varía desde $3,9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ hasta $28,9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. De esta cantidad, tan sólo $1,27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ se corresponden con los sedimentos emitidos aguas abajo de la restauración. Sin los trabajos de restauración hidrológico-forestal llevados a cabo en Tórtoles, que no incluyen la totalidad de los llevados a cabo en la cuenca alta de río Corneja, la concentración de sólidos en suspensión habría superado la cifra indicada por la Directiva Europea Marco del Agua (UE, 2000) para las aguas de salmónidos ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), alcanzando una concentración media de $27,62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, con un rango que varía de $20,85$ a $45,85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sólidos en suspensión (Figura 4.28) e impidiendo, por tanto, el desarrollo adecuado de las poblaciones trucheras.

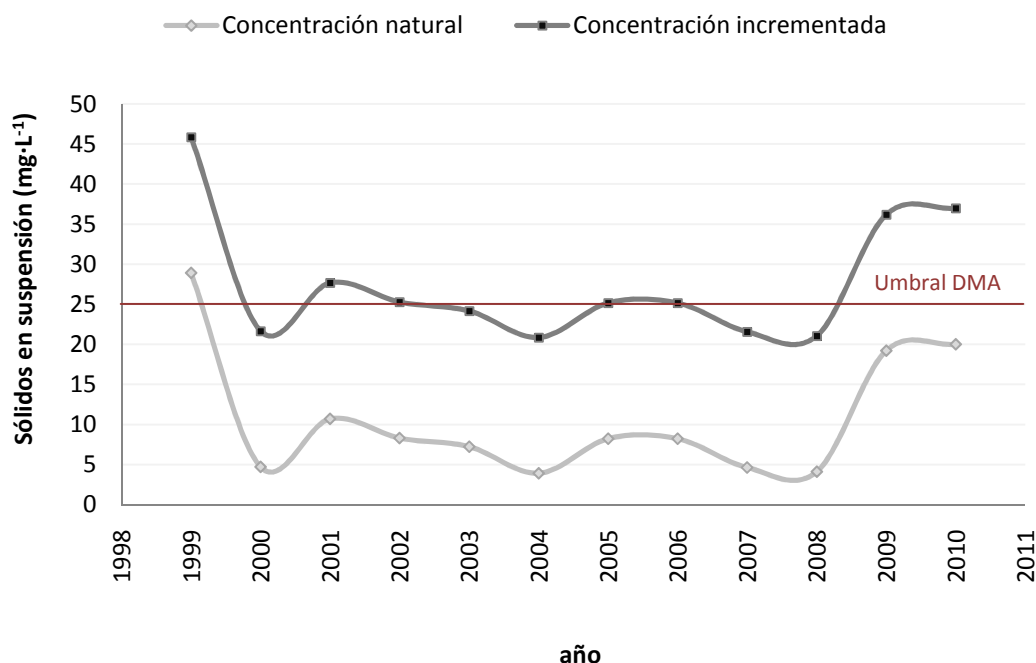


Figura 4.28. Concentración natural de sólidos en suspensión ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) en el río Tormes en la Presa de Santa Teresa durante 1999-2010 (CHD, 2013), y concentración incrementada que poseería si no existiese la actual red de diques en la cuenca alta del Río Corneja. La línea granate indica la concentración máxima permitida por la Directiva Europea Marco del Agua (DMA) para las aguas de salmónidos (UE, 2000)



4.10. TASA TOTAL DE SEDIMENTOS

La tasa total de sedimentos de los diques de la restauración de Tórtoles, obtenida como suma entre la retención y la emisión de sedimentos, se muestra en la Tabla 4.58.

Tabla 4.58. Tasa total de sedimentos para cada dique de la restauración: TSY_A , TSY_B y TSY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

Dique	TSY_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Dique	TSY_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Dique	TSY_A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY_B ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY_C ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
1	3,523	2,484	3,936	41	0,712	0,705	0,737	84	3,416	1,866	2,388
2	1,537	0,920	1,817	42	0,471	0,385	0,439	85	1,204	0,862	1,437
3	0,144	0,160	0,168	43	1,282	1,132	1,395	87	12,996	7,966	6,546
4	0,243	0,237	0,267	44	1,803	1,685	1,539	88	12,955	8,377	11,202
5	2,153	1,694	1,489	45	9,576	10,543	8,888	89	0,860	0,588	0,727
6	0,482	0,401	0,382	46	1,906	2,010	4,829	90	5,260	4,956	4,046
7	0,283	0,365	0,284	47	29,200	18,743	19,770	91	0,244	0,153	0,234
8	0,142	0,111	0,106	48	1,834	1,713	1,483	92	7,962	6,707	6,868
9	0,140	0,146	0,158	49	23,926	18,428	24,646	93	3,869	3,080	4,435
10	0,032	0,056	0,056	50	1,656	1,075	1,316	94	1,515	0,823	1,040
11	0,237	0,222	0,254	51	13,339	12,194	11,075	95	3,237	2,743	2,511
12	0,098	0,125	0,131	52	6,823	7,392	6,175	96	0,208	0,152	0,155
13	0,311	0,345	0,345	54	0,079	0,093	0,106	97	0,141	0,224	0,195
14	1,227	1,295	0,710	55	1,334	0,569	1,066	98	0,717	1,429	1,730
15	1,872	1,496	1,377	56	2,186	1,261	1,282	99	0,755	1,089	0,547
16	2,530	1,567	2,673	57	9,794	7,897	8,888	100	0,904	1,015	0,820
17	12,492	4,546	5,630	59	0,044	0,066	0,042	102	5,377	3,901	1,304
18	1,746	1,473	1,129	61	3,234	2,872	2,937	103	0,997	0,731	0,991
19	7,182	7,588	8,602	62	15,260	14,548	19,880	104	9,911	8,851	6,320
20	3,855	4,089	4,003	63	3,408	1,722	2,259	105	13,213	10,680	15,583
21	11,996	4,536	4,657	64	2,787	1,020	1,301	106	2,691	2,434	2,258
22	4,328	2,895	2,697	65	6,014	2,523	2,575	107	2,171	1,765	1,944
23	3,587	2,398	2,941	66	0,068	0,176	0,139	108	0,568	0,524	0,453
24	7,432	5,445	4,550	67	1,363	1,271	1,176	109	6,071	4,402	4,402
25	7,814	7,071	7,390	68	11,403	9,779	6,764	110	11,347	11,535	7,734
27	59,989	69,500	100,298	69	3,862	1,859	1,380	111	2,216	2,362	1,807
28	32,634	32,512	15,862	70	4,025	3,501	4,677	112	3,339	3,825	4,439
29	2,131	2,728	3,435	71	1,544	1,300	1,205	113	9,777	5,650	7,195
30	10,046	10,741	12,316	72	9,059	5,024	5,452	114	6,074	3,494	4,259
32	0,474	0,856	1,194	74	0,402	0,287	0,460	116	4,077	2,674	4,404
33	48,640	36,977	39,008	75	2,514	2,072	2,263	117	2,583	2,554	1,899
34	15,131	12,947	7,609	76	1,424	0,967	0,838	118	0,776	0,808	0,836
35	24,036	10,831	10,910	78	1,273	0,782	0,639	119	1,025	0,830	0,884
36	29,741	23,159	27,065	79	0,798	0,665	0,647	120	1,158	0,974	1,254
37	6,369	7,080	9,471	80	2,364	2,144	1,768	121	1,467	2,146	1,501
38	0,476	0,343	0,485	81	4,419	4,285	3,820	122	1,944	2,162	1,550
39	3,845	4,352	3,147	82	3,507	2,200	2,890	123	0,586	0,538	0,603
40	1,127	0,780	1,251	83	0,444	0,426	0,421	MEDIA	5,653	4,643	4,969



El valor medio por dique (Tabla 4.59) es de 5,65 t·ha⁻¹·año⁻¹, de acuerdo con la metodología A de estimación del volumen de sedimentos, un 17,87% superior que en el caso de la metodología B y un 12,10% que en el caso de la metodología C. El valor máximo que alcanza es de 59,99 t·ha⁻¹·año⁻¹ (TSY_A) mientras que con las metodologías de estimación del volumen B y C toma valores de 69,50 t·ha⁻¹·año⁻¹ y 100,30 t·ha⁻¹·año⁻¹, respectivamente. Es decir, si los volúmenes de sedimentos o las tasas de erosión son mayores, las diferencias en los resultados obtenidos por aplicación de la metodología A de estimación del volumen de sedimentos y los resultantes de las metodologías de estimación del volumen de sedimentos B y C se incrementan. Es importante indicar que la diferencia entre las tasas es originada por la aplicación de las distintas metodologías en la estimación del volumen de sedimentos, siendo este volumen el dato de partida para obtener esta tasa, pero no se plantean distintas metodologías para la obtención de la tasa total de sedimentos.

Tabla 4.59. Estadística descriptiva de la tasa total de sedimentos (t·ha⁻¹·año⁻¹), obtenida de la aplicación de las distintas metodologías de estimación del volumen: TSY_A , TSY_B , TSY_C

	TSY_A (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	TSY_B (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	TSY_C (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
Media aritmética	5,65	4,64	4,97
Mediana	2,22	1,87	1,81
Desviación típica	9,17	8,58	10,84
Varianza	84,00	73,56	117,50
Coefficiente de Variación (%)	162,13	184,72	218,15
Mínimo	0,032	0,056	0,042
Máximo	59,99	69,50	100,30
Rango	59,96	69,45	100,26
Sesgo Estandarizado	15,22	21,26	28,81
Curtosis	15,07	31,09	54,56
Curtosis Estandarizada	32,71	67,45	118,38

De nuevo las muestras poseen una desviación importante de la normalidad. Sin embargo, como ya se ha indicado, se ha trabajado con los datos originales dado que un cambio de variable para conseguir normalidad en las muestras no ofrece resultados discrepantes con los aquí descritos (ver Anexo III). En el caso de la tasa total de sedimentos, aunque la tabla ANOVA (Tabla 4.60) y el gráfico de medias (Figura 4.29) no reflejan diferencias significativas entre las metodologías, la prueba de Levene indica diferencias entre las tasas obtenidas con la aplicación de las metodologías B y C de estimación del volumen de sedimentos (Tabla 4.61).

Tabla 4.60. Tabla ANOVA para el análisis de la tasa total de sedimentos (TSY)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Entre grupos	60,05	2	30,02	0,33	0,7210
Intra grupos	30.805,90	336	91,68		
Total (Corr.)	30.865,90	338			

Tabla 4.61. Prueba de Levene para el análisis de la tasa total de sedimentos (TSY)

Prueba	P-Valor
0,4071	0,6659

Comparación	Sigma1	Sigma2	Razón-F	P-Valor
TSY_A / TSY_B	9,1652	8,5765	1,1420	0,4835
TSY_A / TSY_C	9,1652	10,8396	0,7149	0,0771
TSY_B / TSY_C	8,5765	10,8396	0,6260	0,0138

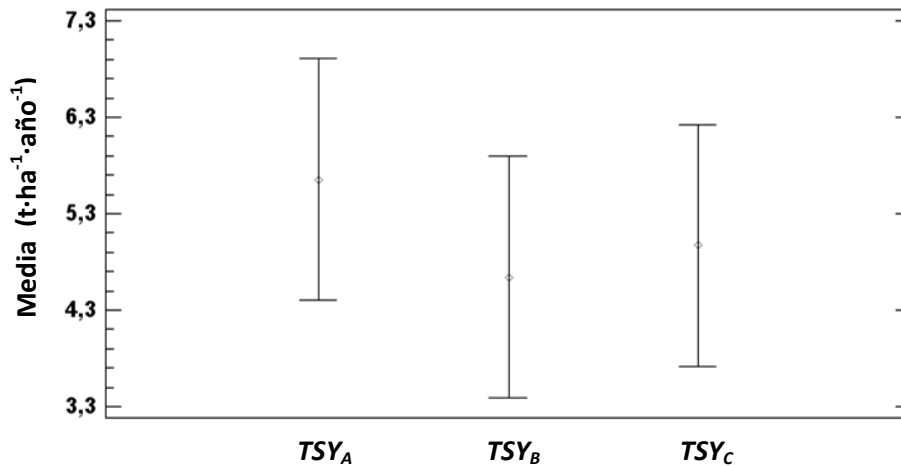


Figura 4.29. Comparación de la tasa total de erosión obtenida por aplicación de las metodologías A, B y C de estimación del volumen de sedimentos (TSY_A , TSY_B y TSY_C , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), e intervalo LSD de Fisher (95,0% de confianza)

El gráfico de dispersión (Figura 4.30) que compara los resultados de tasas totales de sedimentos obtenidas entre la metodología propuesta de estimación del volumen (A) y las metodologías de estimación del volumen propuestas por Castillo *et al.* (2007) (B) y por Romero *et al.* (2007a) (C) se muestra en la Figura 4.30, en la cual se observa una apertura de los datos en forma de abanico. Los coeficientes de correlación para la variable de estudio son de 0,920 entre las metodologías de estimación del volumen A y B, y de 0,803 entre las metodologías A y C, por lo que en ambos casos es bastante elevada. Estos ajustes pueden considerarse buenos porque están siendo compensados por los *outliers* que se observan en el gráfico (Figura 4.30), de forma que eliminando estos valores extremos se puede observar que ambas metodologías infravaloran la tasa de sedimentos con respecto a la metodología propuesta.

El método elegido en este estudio (A) realiza una estimación más realista de la tasa de erosión y emisión y de la tasa total de sedimentos dado que se apoya en un mayor número de datos de campo y de gran exactitud. Si bien en términos generales y con apoyo estadístico puede considerarse que no hay diferencias significativas entre los métodos A, B y C, y a pesar de que las correlaciones entre los tres métodos son buenas, la diferencias entre las tasas medias obtenidas podrían llevar a conclusiones muy dispares. En concreto, la diferencia entre los métodos A y B es de $1,04 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, y la diferencia entre los métodos A y C es de $0,69 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, llegando a superar en

algún caso las $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Teniendo en cuenta que la tasa de erosión tolerable en Europa varía de $0,3$ a $1,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Verheijen *et al.*, 2009), diferencias como las que se observan entre estos métodos pueden llevar a aceptar como tolerables tasas que en realidad no lo son. Por tanto, si los métodos que se basan en simples figuras geométricas subestiman las tasas de erosión, se podrían extraer conclusiones erróneas sobre la efectividad de los diques forestales.

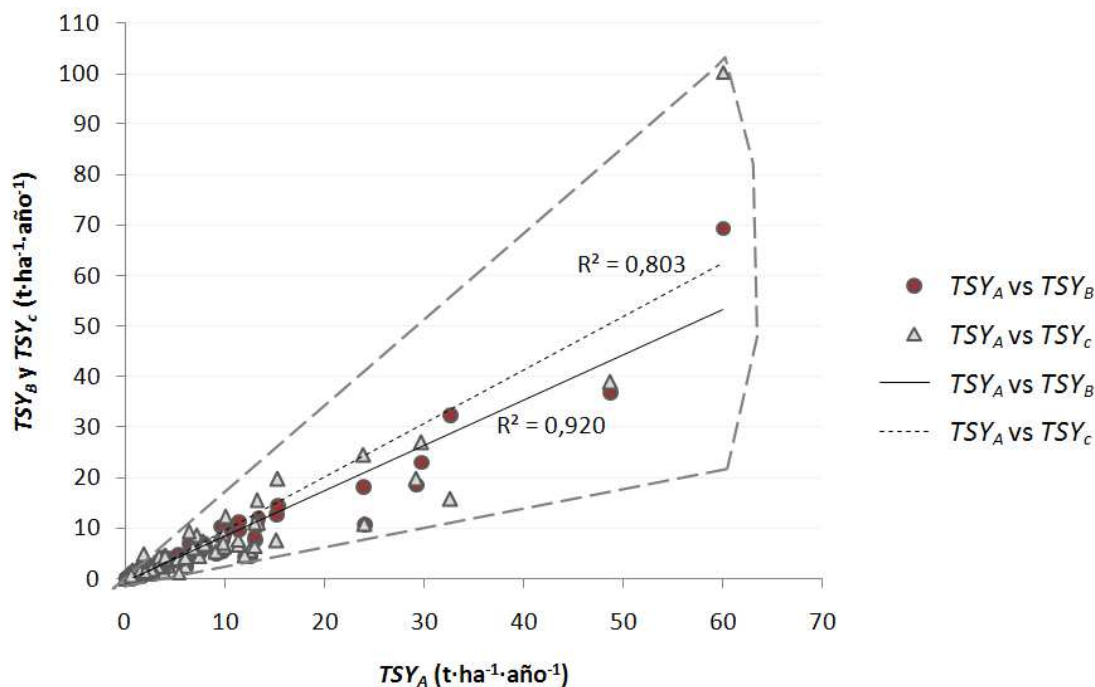


Figura 4.30. Gráfico de dispersión de la tasa total de sedimentos entre la tasa obtenida por aplicación de la metodología A de estimación del volumen TSY_A y las tasas obtenidas por aplicación de las metodologías B y C de estimación del volumen (TSY_B y TSY_C , respectivamente). Se muestra el ajuste lineal entre ellas y el coeficiente de regresión obtenido (R^2).

Por otra parte, es importante señalar que los resultados obtenidos en este estudio ofrecen tasas de sedimentos que en realidad son un umbral mínimo de erosión, por los siguientes motivos:

1. El periodo de tiempo considerado para el cálculo de las tasas de erosión es el transcurrido desde la construcción de los diques hasta las mediciones en campo de las cuñas de sedimentos: 48 años. Esto es debido a que no se conocen datos precisos sobre el momento concreto de su construcción, que debió ser escalonada debido a la reducida mecanización de las tareas en aquella época. Sin embargo, los diques que se hayan construido en último lugar habrán estado reteniendo sedimentos un menor periodo de tiempo, y por tanto en este trabajo se están subestimando las tasas de erosión.
2. El 30% de los diques de la restauración se encuentran totalmente aterrados. Las tasas de erosión obtenidas como resultado de su medición son menores que las que se obtendrían si se conociese el momento de su aterramiento, ya



que la masa de sedimentos se ha retenido en un periodo inferior al considerado (desde la construcción del dique hasta la medición en campo).

Por estos motivos se puede afirmar que el proyecto de restauración hidrológico-forestal llevado a cabo en Tórtoles ha tenido efectos aún más positivos en cuanto a la emisión de sedimentos que los estimados en este trabajo.

Como ya se ha señalado anteriormente, Verheijen *et al.* (2009) indican que en Europa la erosión tolerable toma valores de 0,3 a 1,4 t·ha⁻¹·año⁻¹. En la zona de estudio se supera este rango con creces (5,65 t·ha⁻¹·año⁻¹), por lo que la erosión puede considerarse como no tolerable. En concreto, el 64,60 % de los diques supera la tasa admisible de erosión, entre los cuales abarcan una superficie de 17,84 ha, que se corresponde con el 14,72% de la superficie de aportación individual de los diques analizados. Por su parte, Stamey & Smith (1965) establecen un valor de 5 t·ha⁻¹·año⁻¹ como valor límite para pérdidas admisibles en suelos poco profundos, como los de la zona de estudio, por lo que igualmente, las pérdidas en la cuenca alta del río Corneja no son admisibles. Hudson (1971) señala valores de 2 t·ha⁻¹·año⁻¹ para suelos muy erosionables y Arnoldus (1977) destaca que para suelos con profundidades de 25 cm la tasa de erosión no debe superar las 2 t·ha⁻¹·año⁻¹. En la zona de estudio estos valores son superados por la mayor parte de los diques, lo cual es un indicador de la alta erosión existente en la zona de estudio (Figura 4.31). Por último, de acuerdo con los grados de erosión marcados por la FAO (1979), la erosión en la zona de estudio es ligera (>10 t·ha⁻¹·año⁻¹, Tabla 4.40), si bien algunos diques indican que, según los datos ofrecidos gracias a la medición en campo de su volumen, la erosión es moderada, e incluso alta en uno de los casos.

En la Tabla 4.62 se muestran las tasas medias existentes en diversos lugares de la geografía española. Las tasas medias obtenidas en el lugar de estudio son mayores que las obtenidas por otros autores en zonas del sureste español, si bien en ningún caso realizan la medición en campo de la totalidad de los diques construidos ni realizan esta medición con el nivel de detalle realizado en este trabajo. Ramos (2014), que aplica la metodología propuesta (Díaz, 2011a, 2011b; Díaz *et al.*, 2014a, 2014b), obtiene los mayores volúmenes tras la medición de detalle de 25 diques de gaviones ubicados en la cuenca del río Carrión, que posee un clima mediterráneo continental, al igual que la zona de estudio.

Por otra parte, con los datos obtenidos en este trabajo se ha realizado una clasificación en cuatro grupos de superficie de aportación individual (SI , m³), de la forma más equilibrada posible, y se ha analizado su correlación con la tasa de sedimentos (SY , t·ha⁻¹·año⁻¹) (Tabla 4.63). Como resultado se obtiene que según aumenta la superficie, la correlación disminuye, hasta el punto que pasar de ser positiva a ser negativa. Es decir, con el aumento del área de la cuenca de aportación la tasa de erosión se encuentra limitada. Esto es debido a que parte de los sedimentos se verán atrapados en laderas de poca pendiente, concavidades, llanos aluviales, y otros sumideros, por lo que estas tasas no aumentan con esta superficie, sino que en ocasiones incluso disminuyen, debido a la reducción de las pendientes de las laderas aguas abajo

(Birkinshaw & Bathurst, 2006; De Vente *et al.*, 2007; Griffiths *et al.*, 2006; Verstraeten *et al.*, 2003). Por esta razón, podrían obtenerse valores bajos de tasas de erosión en zonas con mayores superficies de cuenca, aunque la masa de sedimentos retenidos y emitidos sea muy elevada.

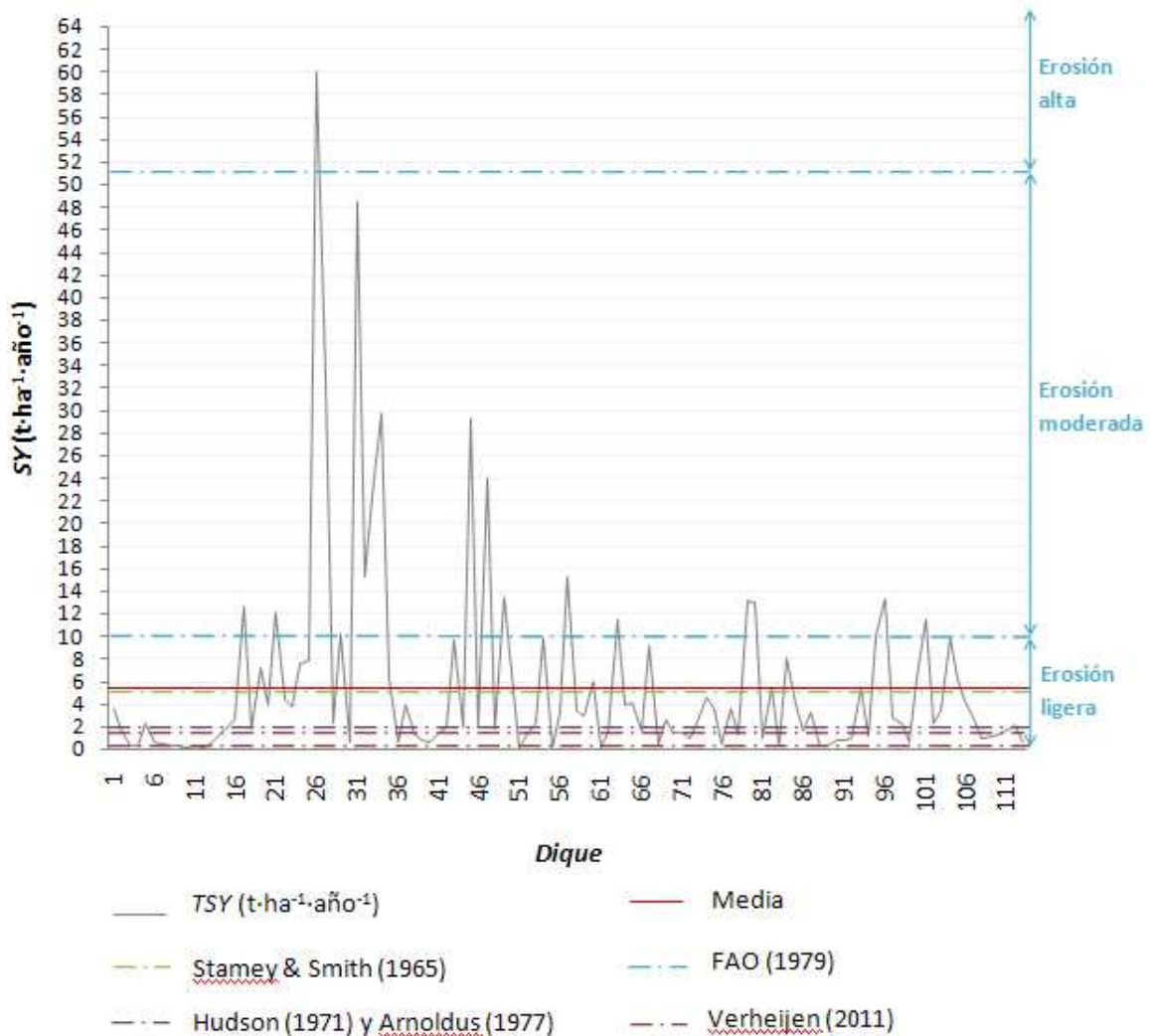


Figura 4.31. Tasa de sedimentos (SY, t·ha⁻¹·año⁻¹) de los diques de la restauración y tolerancias admisibles establecidas por los diferentes autores.

Por último, es digno de mención que en los estudios mencionados desarrollados con anterioridad por otros autores, como Romero *et al.* (2007a), Boix-Fayos *et al.* (2008), Bellín *et al.* (2011), Sougnez *et al.* (2011) o Ramos (2014), se ha realizado la medición de volúmenes, masas de sedimentos atrapados o tasas de erosión en un pequeño porcentaje de los diques existentes, que en el mejor de los casos supera el 50% de los diques construidos, de forma que para obtener un valor global es necesario hacer una extrapolación al total de la restauración o de la cuenca de estudio. Sin embargo, en este trabajo se miden las cuñas de sedimentos de la totalidad de los diques existentes (113 por medición directa y 10 aplicando la ecuación de regresión obtenida a partir de las mediciones), por lo que el valor obtenido es un valor directo, no obtenido por



medias ni por extrapolación de datos, lo cual da mayor fiabilidad a los resultados. De hecho, tal y como se ha expuesto con anterioridad, aún utilizando la misma metodología de medición se obtienen resultados muy dispares en una misma cuenca simplemente por la elección de los diques, según se extrae de sus estudios.

Tabla 4.62. Revisión de las tasas medias de erosión (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) obtenidas en diversos estudios realizados en la Península Ibérica (modificado y ampliado de Bellín *et al.*, 2011)

Cuenca	Escala de estudio	SY ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	Referencia
Rambla Honda (Almería)	Parcela	0,06-0,34	Puigdefabregas <i>et al.</i> (1999)
Rambla Honda (Almería)	Parcela	0,215	Kosmas <i>et al.</i> (1997)
Rambla Honda (Almería)	Ladera	0,23-1,11	Puigdefabregas <i>et al.</i> (1999)
Rambla Honda (Almería)	Ladera	0,1	Solé-Benet (Bellín <i>et al.</i> , 2011)
Sierra de Gador (Almería)	Cuenca	<1	Martín-Rosales <i>et al.</i> (2003)
Cuenca del río Quípar (Murcia) (n=195)	Cuenca	3,96	Romero <i>et al.</i> (2007)
Cuenca del río Quípar (Murcia) (n=13)	Cuenca	0,69	Romero <i>et al.</i> (2007)
Cuenca del río Quípar (Murcia) (n=18)	Cuenca	1,80	Romero <i>et al.</i> (2012)
Sierra Torrecilla, Sierra Carrascoy (Murcia)	Cuenca	0,34	Sougnez <i>et al.</i> (2011)
Rogativa (Murcia)	Cuenca	2,51	Boix-Fayos <i>et al.</i> (2008)
Sierra de Los Filabres, Alhamilla, Estancias (Almería) (n=36)	Cuenca	1,40	Bellín <i>et al.</i> (2011)
Cuenca del río Carrión (Palencia) (n=25)	Cuenca	11,19	Ramos (2014)
Cuenca alta del río Corneja (Ávila) (n=113)	Cuenca	5,65	Este trabajo

Tabla 4.63. Análisis de correlación entre la superficie de aportación individual (SI , m^2) y la tasa de erosión (SY , $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) con los datos agrupados

SI (m^2)	n	Coef. de correlación SI (m^2)- SY ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
0-1.000	37	0,4138
1.000-2.000	20	0,0498
2.000-10.000	34	-0,2023
>10.000	22	-0,2490

n : número de diques

4.11. PENDIENTE ACTUAL

La construcción de los 123 diques en la zona ha tenido efectos hidrogeomorfológicos, siendo el principal de ellos la reducción de la pendiente en las cárcavas y barrancos de Tórtoles, variable que además influye en las tasas de erosión.



Se han determinado los valores de las pendientes actuales (*PA*) que poseen las cárcavas gracias al asentamiento de las cuñas de sedimentación, así como las pendientes originales que poseían en ese tramo (*PO*). La diferencia entre ambas se corresponde con la reducción de la pendiente (*RP*). Todos estos valores se muestran en la Tabla 4.64, indicando además si se trata de diques totalmente aterrados (*AT*) o de diques con un aterramiento parcial (*AP*).

Tabla 4.64. Pendiente original (*PO*), pendiente actual (*PA*) y reducción de la pendiente de las cárcavas (*RP*), medidos en %, e indicación de si se trata de aterramiento total (*AT*) o parcial (*AP*) del dique

Dique	<i>PO</i> (%)	<i>PA</i> (%)	<i>RP</i> (%)	<i>AT/</i> <i>AP</i>	Dique	<i>PO</i> (%)	<i>PA</i> (%)	<i>RP</i> (%)	<i>AT/</i> <i>AP</i>	Dique	<i>PO</i> (%)	<i>PA</i> (%)	<i>RP</i> (%)	<i>AT/</i> <i>AP</i>
1	19,36	14,59	4,77	AP	41	29,52	23,89	5,63	AP	84	50,45	39,55	10,90	AP
2	14,28	10,15	4,13	AP	42	24,54	11,82	12,72	AP	85	52,44	34,04	18,40	AT
3	26,15	15,49	10,66	AP	43	20,58	15,87	4,71	AP	87	25,01	5,12	19,89	AT
4	15,62	4,73	10,89	AP	44	27,32	20,83	6,49	AP	88	45,22	17,90	27,32	AT
5	20,97	9,93	11,05	AP	45	35,34	19,68	15,66	AP	89	35,15	19,17	15,98	AP
6	28,14	16,23	11,91	AP	46	42,74	51,06	-8,32	AP	90	49,14	25,63	23,51	AP
7	28,31	19,74	8,57	AP	47	44,81	21,95	22,86	AP	91	45,90	31,15	14,74	AP
8	28,61	29,65	-1,04	AP	48	20,49	0,12	20,36	AP	92	40,70	19,97	20,73	AP
9	26,17	21,87	4,30	AP	49	45,22	12,81	32,41	AP	93	46,67	25,48	21,19	AT
10	11,65	9,39	2,26	AP	50	34,80	21,47	13,34	AT	94	41,27	8,27	33,00	AT
11	34,45	26,96	7,49	AP	51	35,66	25,98	9,67	AT	95	39,94	22,16	17,78	AP
12	31,80	27,70	4,10	AP	52	27,00	16,33	10,67	AP	96	20,27	4,09	16,18	AP
13	22,41	19,11	3,30	AP	54	20,72	15,03	5,70	AP	97	9,67	6,82	2,85	AP
14	17,98	9,31	8,67	AP	55	20,89	14,37	6,52	AT	98	13,53	3,47	10,06	AP
15	19,23	12,07	7,17	AP	56	21,71	7,10	14,61	AT	99	14,19	3,65	10,54	AP
16	15,37	8,22	7,16	AP	57	32,38	23,09	9,29	AT	100	26,05	2,06	23,99	AP
17	28,49	17,52	10,97	AP	59	26,30	30,93	-4,63	AP	102	11,49	4,05	7,44	AP
18	15,11	5,41	9,70	AP	61	24,83	17,71	7,12	AP	103	12,83	5,40	7,43	AT
19	18,65	12,41	6,24	AP	62	13,91	5,69	8,22	AP	104	22,00	9,63	12,38	AT
20	15,79	6,44	9,35	AP	63	16,88	7,24	9,64	AT	105	31,66	10,50	21,16	AT
21	10,63	8,65	1,98	AP	64	15,06	13,99	1,07	AP	106	27,13	12,88	14,25	AT
22	12,00	8,26	3,74	AP	65	13,64	13,01	0,62	AP	107	35,39	15,63	19,76	AT
23	7,84	5,15	2,69	AP	66	16,19	13,77	2,42	AP	108	26,62	12,75	13,87	AP
24	10,84	3,98	6,86	AP	67	28,37	10,71	17,65	AP	109	23,29	17,87	5,42	AT
25	16,50	7,00	9,50	AT	68	22,77	12,65	10,12	AT	110	31,72	21,51	10,21	AT
27	37,46	19,54	17,92	AT	69	31,91	23,68	8,24	AP	111	27,15	16,85	10,30	AT
28	29,40	20,80	8,61	AT	70	34,15	18,38	15,78	AT	112	43,02	24,65	18,37	AT
29	31,32	21,74	9,58	AT	71	32,99	20,25	12,73	AP	113	22,33	17,14	5,20	AP
30	27,30	13,68	13,62	AT	72	35,44	24,95	10,49	AT	114	36,87	24,19	12,68	AT
32	16,69	13,56	3,13	AT	74	24,19	23,30	0,89	AP	116	38,09	14,26	23,83	AP
33	42,20	15,73	26,47	AT	75	27,12	14,88	12,24	AT	117	32,72	23,44	9,28	AP
34	50,88	33,57	17,31	AT	76	32,18	27,76	4,43	AT	118	15,53	8,32	7,21	AP
35	32,95	26,67	6,28	AP	78	27,68	18,14	9,54	AT	119	26,08	17,63	8,45	AP
36	39,38	34,79	4,58	AT	79	46,08	18,33	27,75	AP	120	69,33	30,00	39,33	AP
37	25,44	23,37	2,06	AP	80	28,66	10,23	18,43	AP	121	36,16	21,83	14,33	AP
38	34,66	24,49	10,17	AT	81	25,64	16,17	9,48	AP	122	30,62	19,93	10,69	AP
39	27,98	20,74	7,23	AP	82	36,22	17,71	18,51	AP	123	19,65	14,32	5,34	AP
40	39,92	22,22	17,71	AP	83	36,56	18,44	18,12	AP	MEDIA	28,21	16,92	11,29	-



En la Figura 4.32, donde quedan representadas ambas pendientes, se observa cómo se han reducido y suavizado las pendientes gracias a la construcción de los diques de retención de sedimentos. De acuerdo con la Tabla 4.65 las pendientes de las cuñas de la restauración de Tórtoles se han visto disminuidas una media de un 11,29% respecto de su valor original, con un máximo de reducción de la pendiente en un 39,33% en uno de los casos. Los valores negativos en tres de los casos (diques 8, 46 y 59) pueden deberse a la medición puntual de la pendiente original en el tramo concreto, probablemente debido al deslizamiento de las laderas y enterramiento del cauce original en el punto concreto de la medición inmediatamente aguas abajo del dique, sin que ello suponga que la cárcava en la que se encuentran ubicados hayan sufrido un aumento de pendiente. Los resultados de sesgo y curtosis estandarizados indican que en ninguno de los casos las muestras siguen un patrón de normalidad.

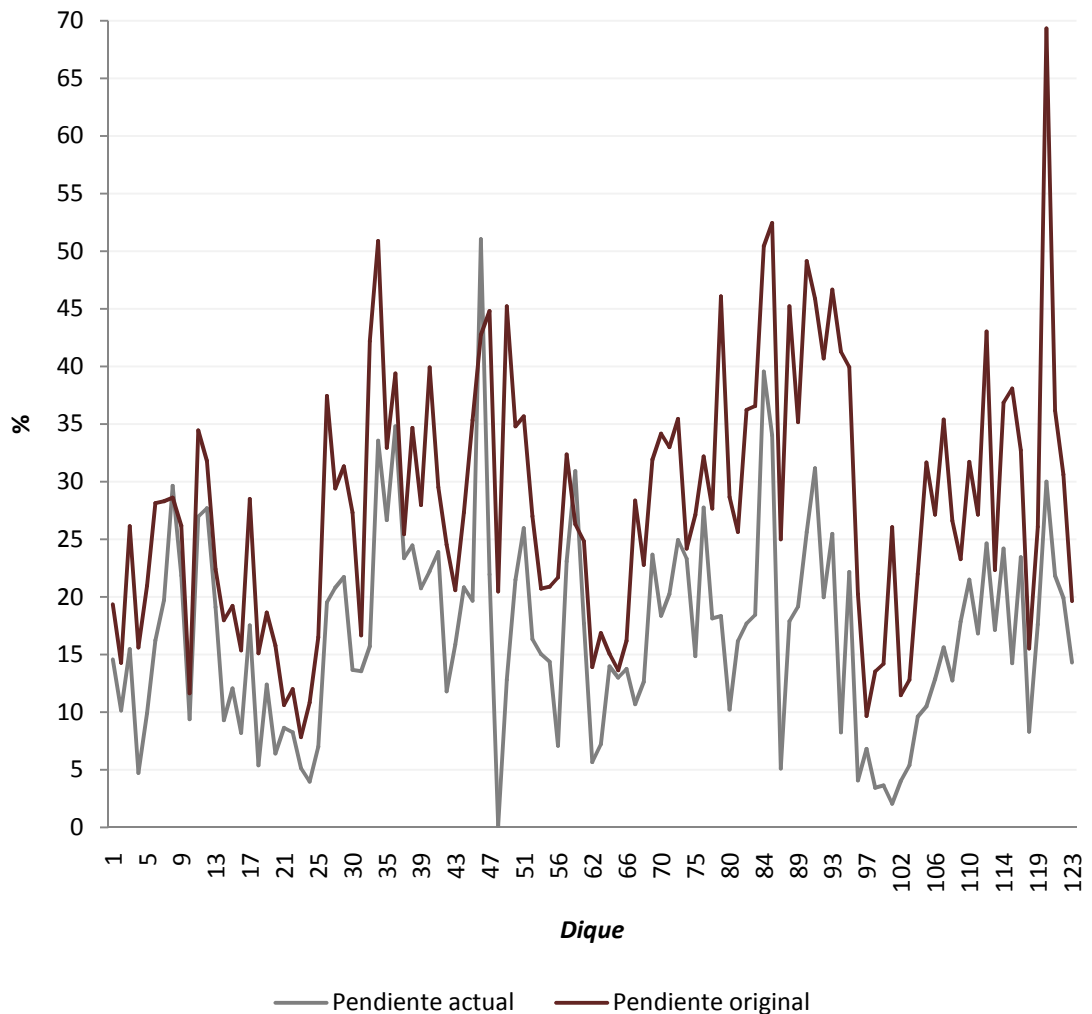


Figura 4.32. Pendientes actuales y originales medidas para el tramo en el que se ubica cada dique de la restauración



Tabla 4.65. Estadística descriptiva de la pendiente original (*PO*, %), de la pendiente actual (*PA*, %) y de la reducción de pendiente (*RP*, %) ocasionada por la cuña de sedimentos de cada dique

	<i>PO</i> (%)	<i>PA</i> (%)	<i>RP</i> (%)
Media aritmética	28,21	16,92	11,29
Mediana	27,30	16,85	10,06
Desviación típica	11,18	8,68	7,79
Varianza	124,88	75,28	60,69
Coefficiente de variación (%)	39,61	51,29	68,97
Mínimo	7,84	0,12	-8,32
Máximo	69,33	51,06	39,33
Rango	61,50	50,94	47,65
Sesgo estandarizado	2,50694	2,87068	3,53336
Curtosis	0,56	1,25	1,36
Curtosis estandarizada	1,20788	2,7027	2,9539

La nueva pendiente media obtenida a partir de las mediciones realizadas es del 16,92%, con un mínimo del 0,12% y un máximo del 51,06%. La pendiente media original era del 28,21%, con un rango que varía del 7,84% al 69,33%, por lo que se han conseguido pendientes más suaves a las originales, con una media de reducción del 11,29% (Figura 4.33), como se indicó anteriormente.

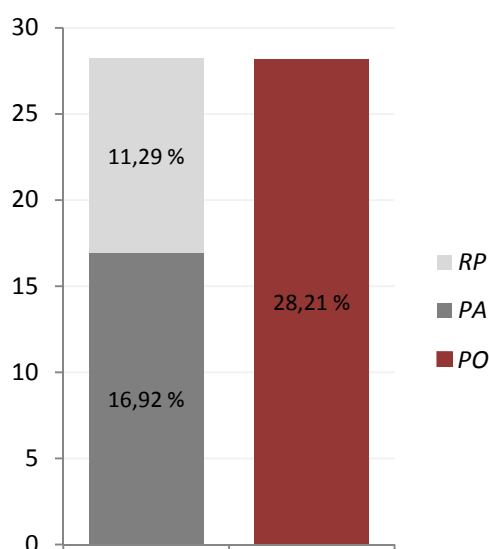


Figura 4.33. Pendiente actual media (*PA*, %), pendiente original media (*PO*, %) y reducción media de la pendiente (*RP*, %)

Porto & Gessler (1999) analizaron la pendiente de los arroyos de la región de Calabria, en Italia (denominados “fiumare”), y obtuvieron una reducción media de la pendiente del 2,76% a partir de la medición de las pendientes conseguidas por 132 diques ubicados en 10 arroyos de la zona (Tabla 4.66).



Tabla 4.66. Pendientes original y conseguida tras el establecimiento de diques de retención en los arroyos de la región de Calabria (Porto & Gessler, 1999)

Arroyo	Nº de diques	PO (%)	PC (%)	RP (%)
S. Elia	5	8,74	5,18	3,56
Gallico	7	6,71	3,19	3,52
La Verde	12	3,91	2,66	1,25
Molaro	21	11,25	6,18	5,07
Careri	3	3,93	1,83	2,10
S. Agata	21	8,26	4,96	3,30
Valanidi	22	6,65	3,47	3,18
Cino	21	4,42	3,05	1,37
Coriglianelto	6	3,45	1,85	1,60
Raganello	14	5,36	2,76	2,60
Media	13,2	6,27	3,51	2,75

Roshani (2003) observó una reducción de la pendiente media del 7,6% (varió del 9,6% al 2%) gracias a la construcción de diques en el alto Rendam (Kan, Irán). Por su parte, Sobrino & Caba (2012) han obtenido una reducción de la pendiente de entre un 8 y un 10% (pasa del 10% al 2% e incluso al 0% de pendiente) gracias a 5 diques de hormigón en masa construidos en la parte alta de los torrentes de montaña que tributan al río Saldes (Barcelona). En estas experiencias llevadas a cabo en la zona mediterránea la reducción ha sido menor que en Tórtoles, que alcanza un valor medio del 11,29% de reducción, como ya se ha indicado. Es por ello que el efecto de reducción de la pendiente que genera la construcción los diques forestales es especialmente significativo en la zona de estudio. No obstante, es importante señalar que en la zona de estudio las pendientes originales de las cárcavas son muy elevadas (una media del 28,21%) y que la reducción de la pendiente aumenta conforme aumenta la pendiente original (Tabla 4.67).

Tabla 4.67. Reducción de la pendiente (RP, %) por grupos, en función de la pendiente original (PO, %)

PO (%)	RP (%)
0-15%	5,29
15-30%	8,94
30-45%	13,80
45-60%	23,29

Se ha realizado un análisis de correlación para determinar la relación de las distintas variables y su influencia en la formación de la pendiente de equilibrio conseguida. Las variables utilizadas en este análisis son las siguientes:

- Pendiente original (*PO*, %) sobre la que se asienta la cuña de sedimentos actual.
- Altura del aterramiento (*AA*, m): altura de la cuña de sedimentos en contacto con el dique.
- Longitud de la cuña de sedimentos (*LC*, m) medida en superficie.



- Altura útil del dique (AU , m): máxima altura del dique capaz de almacenar sedimentos.
- Altura útil x longitud de la cuña ($AU \cdot LD$, m^2)
- Superficie cubierta de vegetación arbolada (SV , m^2): Superficie cubierta de vegetación con respecto a la superficie de la cuenca de aportación individual de cada dique.

La Tabla 4.68 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada variable indicada y la variable "pendiente actual". El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. Los resultados estadísticos demuestran que existe una fuerte correlación entre la pendiente actual y la pendiente original ($R=0,67$). Sin embargo, entre el resto de valores existe una baja correlación con la pendiente actual. No obstante, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A mayor longitud de cuña y a mayor altura de ésta y de la estructura de retención, la pendiente actual es menor (correlación negativa). El relleno de sedimentos de los diques ayuda a reducir las pendientes y a conseguir la estabilización de los taludes, lo cual es un indicador del efecto beneficioso de estas estructuras.
- Cuanto mayor es la superficie cubierta la pendiente actual conseguida es más pequeña (correlación negativa). Sin embargo, en teoría la reducción de pendiente debe ser mayor conforme mayor sea el aporte de sedimentos, que a su vez es máximo cuando se consigue el aterramiento completo del dique y la pendiente de equilibrio. No obstante, para poder evaluar esta circunstancia sería necesario estudiar la evolución de la pendiente con respecto a la evolución de la vegetación a lo largo del tiempo, lo cual no es posible ya que no se dispone de esta información.
- Las tasas de erosión, tanto la obtenida a partir de los sedimentos retenidos, como la tasa de emisión de sedimentos y la tasa total de la zona de estudio, aumentan con un aumento de la pendiente. La correlación es mayor con la tasa de emisión de sedimentos, lo cual indica que la reducción de pendiente que consiguen los diques de retención ayuda a disminuir las emisiones de partículas aguas abajo de la restauración.

No obstante, el P-valor, que prueba la significación estadística de las correlaciones estimadas, es superior a 0,05 en el caso de la altura de aterramiento, la altura útil del dique, la tasa de retención de sedimentos y la tasa total de erosión, lo cual indica que las correlaciones no son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 4.68. Análisis de correlación entre la pendiente actual y las variables: pendiente original (PO), altura del aterramiento (AA) y longitud de la cuña (LC)

	PO (%)	AA (m)	LC (m)	AU (m)	$AU \cdot LD$ (m^2)	SV (%)	SY ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	SE ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	TSY ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
Correlación	0,6673	-0,1555	-0,3968	-0,1830	-0,1995	-0,1140	0,0754	0,2311	0,0763
P-valor	0,0000	0,1000	0,0000	0,0523	0,0342	0,2293	0,4277	0,0138	0,4218

Como se ha dicho, la mayor correlación se ha obtenido entre la pendiente actual conseguida gracias a la restauración y la pendiente original de la cárcava. Se ha realizado un análisis de regresión entre ambas variables y se ha obtenido un buen ajuste lineal gracias a la medición de las pendientes de los tramos en los que se ubican las 113 cuñas retenidas por 113 diques de la restauración (Figura 4.34):

$$PA = 0,5584PO + 1,1632 \quad R^2 = 0,5173$$

Donde PA es la pendiente actual (%) y PO es la pendiente original de la cárcava (%).

Romero *et al.* (2007a) obtienen una correlación negativa ($R = -0,78$) entre la pendiente media de la cárcava y la tasa de erosión en la cuenca del río Quípar, de forma que cuanto mayor es la pendiente menor la erosión. En las Sierras de los Filabres y Alhamilla y en la Sierra de las Estancias (Almería), Bellín *et al.* (2011) encuentran asimismo una correlación negativa entre ambas variables, pero muy débil ($R = -0,11$). Sin embargo, lo normalmente esperado es una correlación positiva entre la erosión y la pendiente original de la cárcava, como la obtenida en este trabajo ($R = 0,23$), ya que un mayor relieve va asociado a una mayor energía de escorrentía y transporte de los sedimentos (Cerdà & García-Fayos, 1995), por lo que una reducción en la pendiente implica un menor volumen de sedimentos en el flujo de agua (Díaz *et al.*, 2014a, 2014b). Los resultados no esperados en Romero *et al.* (2007a) en cuanto a estas relaciones pueden significar que la pendiente media del lecho está relacionada con otra u otras variables que reducen la tasa de sedimentos, tales como la ausencia de prácticas agrícolas o un alto contenido de fragmentos de roca, variable con la que Bellín *et al.* (2011) encuentran una relación negativa. Por ejemplo, la existencia de arbolado que cubra la superficie influye en la pendiente y por tanto en las tasas de erosión, tal y como se extrae de este trabajo.

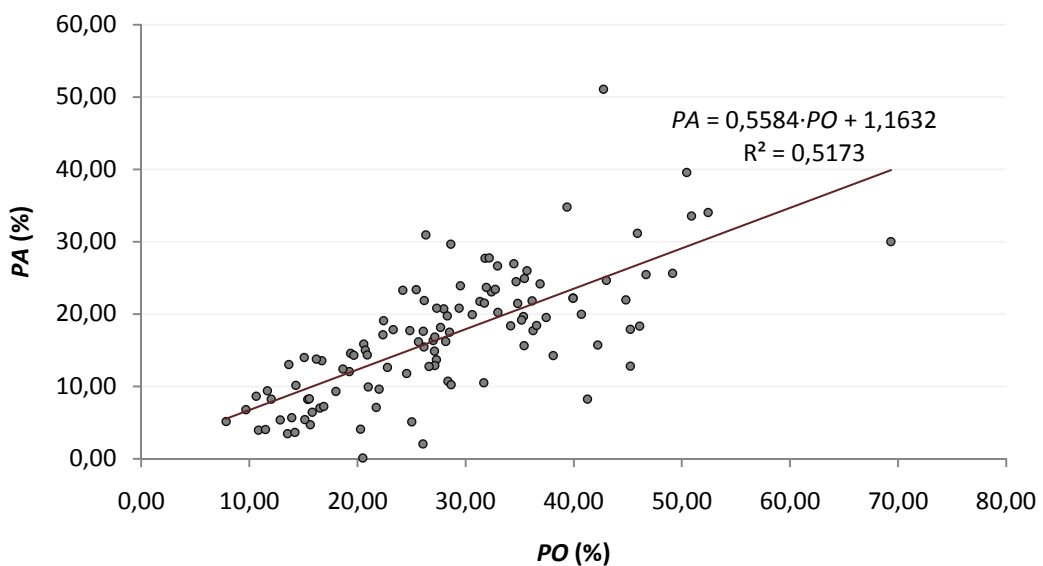


Figura 4.34. Ajuste de regresión entre la pendiente actual (PA , %) y la pendiente original (PO , %)



Por otro lado, se ha realizado un análisis de regresión múltiple para las variables con mayor correlación con la pendiente actual (PA , %), en concreto con la pendiente original (PO , %), la altura de aterramiento (AA , m) y la longitud de la cuña (LC , m). La ecuación del modelo ajustado es la siguiente, con un valor de R^2 de 0,5685:

$$PA = 4,24029 + 0,652355PO - 3,44789AA + 0,196693LC$$

Siendo PA la pendiente actual (%), PO la pendiente original (%), AA la altura de aterramiento (m) y LC la longitud de la cuña (m).

Puesto que el P-valor en la Tabla ANOVA (Tabla 4.69) es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 4.69. Análisis del modelo de regresión múltiple para la pendiente actual de la cuña de sedimentos

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
PA (%)	4,2403	1,9812	2,1403	0,0345
PO (%)	0,6523	0,0641	10,1718	0,0000
AA (m)	-3,4479	0,6568	-5,2494	0,0000
LC (m)	0,1967	0,0952	2,0667	0,0411

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	4804,04	3	1601,35	47,86	0,0000
Residuo	3646,74	109	33,4546		
Total (Corr.)	8450,78	112			

PA : Pendiente actual (%); PO : pendiente original (%); AA : altura de aterramiento (m); LC : longitud de la cuña (m)

$R^2 = 56,8473 \%$

Error estándar del estadístico = 5,7842

Error absoluto medio = 3,9199

Estadístico Durbin-Watson = 1,8966 (P=0,2924)

Esta ecuación resulta de interés, especialmente para estimar las pendientes a conseguir con este tipo de estructuras en zonas acarcavadas con texturas mayoritariamente arenosas y clima mediterráneo continental, de forma que se utilicen al máximo de su capacidad (aterramiento total) y por tanto al máximo de su eficiencia, minimizando los costes.

El estadístico R^2 indica que el modelo de regresión múltiple indicado explica el 56,85% de la variabilidad en la pendiente actual. De acuerdo con el error estándar del estimado, la desviación estándar de los residuos es 5,78, y conforme al error absoluto medio, el valor medio de los residuos es 3,92. En cuanto al estadístico de Durbin-Watson, dado que el P-valor es mayor que 0,05, no existe una autocorrelación serial en los residuos, con un nivel de confianza del 95,0%.

La Tabla 4.70 muestra las correlaciones estimadas entre los coeficientes en el modelo ajustado, que sirven para detectar la presencia de multicolinealidad severa. De



acuerdo con los datos obtenidos, existe correlación entre la pendiente original y la altura de aterramiento, y entre la pendiente original, la altura de aterramiento y la pendiente actual con respecto a la longitud de la cuña, ya que se obtienen correlaciones con valores absolutos mayores a 0,5.

Tabla 4.70. Matriz de correlación para las estimaciones de los coeficientes del modelo de regresión para la pendiente de la cuña de sedimentos (%)

	PA (%)	PO (%)	AA (m)	LC (m)
PA (%)	-	-0,8165	0,1324	-0,5932
PO (%)	-0,8165	-	-0,5641	0,6425
AA (m)	0,1324	-0,5641	-	-0,6627
LC (m)	-0,5932	0,6425	-0,6627	-

PA: Pendiente actual (%); PO: pendiente original (%); AA: altura de aterramiento (m); LC: longitud de la cuña (m)

El análisis de regresión múltiple con estos factores dos a dos ofrece resultados de R^2 inferiores a los obtenidos aplicando la regresión múltiple con los tres factores indicados. Igualmente, la regresión simple ofrece peores resultados, por lo que se estima más adecuada la regresión múltiple indicada.

El 30,08% de los diques de la restauración de Tórtoles se encuentran completamente aterrados, y se desconoce desde qué momento se encuentran en esta situación. Esta cuestión puede influir en la pendiente, de forma que la pendiente modificada en relación con las variables estudiadas se comporte de distinta manera en diques aterrados y en diques no aterrados. Sin embargo, el análisis de correlaciones de los datos, separando entre estos dos tipos de diques, ofrece resultados similares (Tabla 4.71). Además, de acuerdo con el estudio realizado de la superficie cubierta de vegetación, se ha comprobado que se ha estabilizado la cobertura vegetal, por lo que se puede afirmar que la producción de sedimento en la actualidad no es alta.

Varios autores han propuesto diversas fórmulas para establecer la pendiente estable conseguida gracias a las actuaciones de control de la erosión (García Nájera, 1943; López-Cadenas, 1998; Vargas, 2002; Conesa, 2004; Conesa & García, 2007b), la cual es denominada pendiente estable, pendiente de equilibrio o pendiente de compensación. En la zona de estudio se ha conseguido una pendiente estable en las cárcavas de la restauración en las que se han construido diques, gracias tanto a la construcción de estas estructuras como a la repoblación realizada en la zona de estudio, de forma que en la actualidad el arbolado también ha alcanzado la estabilidad, formando un conjunto estable de actuación contra los procesos erosivos que sufrían los barrancos y laderas de Tórtoles. No obstante, se trata de fórmulas teóricas que permiten determinar la pendiente de equilibrio, así como el número de estructuras necesarias y el espaciamiento entre ellas para conseguir el máximo rendimiento, y que por tanto son de ayuda antes de llevar a cabo su construcción. De hecho, en los principios de la corrección hidrológico-forestal se definía la pendiente de compensación por comparación con pendientes reales obtenidas mediante la acción de diques construidos con anterioridad, de represas naturales o de barrancos con características



similares (Pérez-Soba, 2002). Es por ello que el caso de estudio también se pretende obtener conclusiones a partir de la acción de la naturaleza sobre los diques forestales. En la zona de estudio se han llevado a cabo las estructuras y se ha conseguido la estabilización de la zona, por lo que es especialmente útil obtener de forma real, no teórica y gracias a un gran número de mediciones en campo, la relación entre las pendientes original y estable. Otros autores han obtenido las relaciones mostradas en la Tabla 4.72, recogidas por Vargas (2006):

Tabla 4.71. Estudio de los análisis de correlación para la pendiente de la cuña de sedimentos (%), diferenciando entre diques aterrados y no aterrados

	Análisis	Variable dependiente	Variables independientes	Coefficiente de correlación	R ² (%)	P-Valor (ANOVA)
Diques aterrados	Regresión múltiple	PA	PO	0,6673	53,4237	0,0000
			AA	-0,1555		
			LC	-0,3968		
Diques aterrados	Regresión múltiple	PA	PO	0,6673	50,3491	0,0000
			AA	-0,1555		
			Regresión simple: lineal	PO		
Diques no aterrados	Regresión múltiple	PA	PO	0,6726	57,9344	0,0000
			AA	-0,080		
			LC	-0,4363		
Diques no aterrados	Regresión múltiple	PA	PO	0,6726	57,5358	0,0000
			AA	-0,080		
			Regresión simple: lineal	PO		

PA: pendiente actual (%); PO: pendiente original (%); AA: altura de aterramiento (m); LC: longitud de la cuña (m)

Tabla 4.72. Relaciones entre la pendiente original y la pendiente de compensación, recogidas por Vargas (2006) para las diferentes experiencias

De forma general	$0,50 \cdot S \leq S_c \leq 0,67 \cdot S$
Experiencia Italiana	$S_c = 0,66 \cdot S$
Experiencia Norteamericana	$S_c = 0,70 \cdot S$
Experiencia PROMIC (Cochabamba, Bolivia)	$S_c = 0,81 \cdot S$
Método de cálculo recomendado	$S_c = 0,66 \cdot S$

S_c : Pendiente de compensación; S: Pendiente original del torrente

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la zona de estudio la relación entre la pendiente original y la pendiente de equilibrio es la siguiente:

$$S_c = 0,73 \cdot S$$

Donde S_c es la pendiente de compensación y S la pendiente original de la cárcava. Es decir, la pendiente de compensación o de equilibrio en Tórtoles se corresponde con el 73% de la pendiente original de las cárcavas. Esta relación es de gran utilidad práctica a la hora de llevar a cabo construcciones de nuevos diques en la zona de estudio o en



zonas similares. Al fin y al cabo, la pendiente de equilibrio es un valor teórico que en la realidad dependerá de las formas resultantes de los procesos erosivos fluvio-torrenciales que han sido modificados por la interposición de diques en el cauce (Conesa & García, 2007b).

Por otro lado, la reducción de las pendientes gracias a la cuña de sedimentos retenida en cada dique genera una interrupción del flujo, lo cual facilita la infiltración, disminuye la energía de transporte del flujo y genera un flujo de aguas limpias (Conesa, 2004; Gil Guzmán, 2004; Conesa & García, 2007b). La oportunidad de infiltración es especialmente importante para la recarga de acuíferos (Conesa & García, 2007b), y particularmente en Tórtoles, en cuyas laderas se encuentra un lehm granítico de una permeabilidad baja-media que actúa como un acuífero de interés local, así como depósitos de 3 ó 4 metros de potencia de arcosas y arenas, que poseen una permeabilidad media-alta, y que se cargan gracias a la infiltración del agua de lluvia y por escorrentía superficial. En concreto, la tasa de infiltración promedio de la zona en 14 puntos de muestreo es de $424,98 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (Mongil, 2014b, Com. Pers.).

Por último, gracias a la cuña de sedimentos se conforma una superficie estable, de pendiente mucho más reducida que la existente antes de la construcción de los diques. Esta superficie puede ser apta para plantaciones que pueden conformarse como tierras de cultivo fértiles (Xu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2013). Se observan ejemplos de estas nuevas tierras de cultivo a nivel internacional en China, en concreto en la meseta de Loess (Xu *et al.*, 2004), en la provincia de Shanxi (Fang, 1999) o en la región Loess Hill Ravine, (Xu & Wang, 2000), pero también a nivel nacional en la Sierra de Alcaráz (Albacete, España) (Navarro, 2014b, Com. Pers.).

García-Nájera (1954), en base a ensayos de laboratorio y cálculos analíticos, determina dos pendientes críticas para el establecimiento de cultivos:

- Pendiente de iniciación de la erosión, que fija en un 7-8%
- Pendiente de arrastre total, que fija en un 18%

Además determina una pendiente máxima del 30% para los terrenos de pastizales. Estos valores coinciden con las conclusiones que se extraen de la primera Clasificación Agrológica de Suelos propuesta por Bennet (1939) y que ha sido aplicada por todo el mundo con las adaptaciones necesarias. El valor de pendiente de iniciación de la erosión fijado por García-Nájera (1954) fue ampliado por López-Cadenas & Blanco (1968) hasta el 12 %. Estos autores determinan, en base a los valores de pendiente indicados, índices de protección del suelo por la vegetación a partir de los cuáles se establecieron en España las zonas prioritarias para la repoblación forestal en cuencas vertientes necesitadas de restauración hidrológico-forestal (Mintegui, 2007).

En la zona de estudio, gracias a las actuaciones llevadas a cabo en las laderas y barrancos de Tórtoles se ha conseguido una reducción de la pendiente y la formación de superficies estables tras los diques construidos. En la Tabla 4.73 se muestran las pendientes de cuña conseguidas y la superficie que forma la actual cuña de sedimentación.

Tabla 4.73. Superficies estables conseguidas gracias a la cuña de sedimentos ($S_{cuña}$, m²) y pendiente de cada cuña ($P_{cuña}$, %)

Dique	$S_{cuña}$ (m ²)	$P_{cuña}$ (%)	Dique	$S_{cuña}$ (m ²)	$P_{cuña}$ (%)	Dique	$S_{cuña}$ (m ²)	$P_{cuña}$ (%)
1	14,55	14,59	41	30,00	23,89	84	3,10	39,55
2	11,10	10,15	42	6,14	11,82	85	7,50	34,04
3	9,15	15,49	43	17,55	15,87	87	62,05	5,12
4	57,90	4,73	44	23,40	20,83	88	22,00	17,90
5	51,15	9,93	45	37,80	19,68	89	12,30	19,17
6	26,90	16,23	46	14,50	51,06	90	10,05	25,63
7	9,10	19,74	47	44,60	21,95	91	4,00	31,15
8	11,80	29,65	48	15,00	0,12	92	23,90	19,97
9	8,00	21,87	49	14,90	12,81	93	22,80	25,48
10	10,00	9,39	50	13,00	21,47	94	15,15	8,27
11	10,00	26,96	51	35,60	25,98	95	27,80	22,16
12	6,80	27,70	52	53,10	16,33	96	18,60	4,09
13	22,80	19,11	54	9,85	15,03	97	40,20	6,82
14	46,35	9,31	55	59,40	14,37	98	104,10	3,47
15	30,00	12,07	56	25,40	7,10	99	53,55	3,65
16	27,15	8,22	57	49,50	23,09	100	29,60	2,06
17	38,10	17,52	59	13,23	30,93	102	390,75	4,05
18	8,50	5,41	61	18,20	17,71	103	742,25	5,40
19	27,54	12,41	62	211,50	5,69	104	82,50	9,63
20	16,70	6,44	63	153,74	7,24	105	38,89	10,50
21	13,65	8,65	64	12,15	13,99	106	36,00	12,88
22	11,40	8,26	65	9,95	13,01	107	49,50	15,63
23	23,47	5,15	66	22,35	13,77	108	14,50	12,75
24	19,30	3,98	67	5,75	10,71	109	21,00	17,87
25	473,20	7,00	68	21,10	12,65	110	113,94	21,51
27	56,10	19,54	69	35,70	23,68	111	30,50	16,85
28	77,25	20,80	70	13,60	18,38	112	29,10	24,65
29	12,30	21,74	71	15,40	20,25	113	37,80	17,14
30	47,40	13,68	72	32,80	24,95	114	84,15	24,19
32	339,00	13,56	74	17,80	23,30	116	11,50	14,26
33	18,90	15,73	75	21,60	14,88	117	60,30	23,44
34	15,11	33,57	76	12,15	27,76	118	14,25	8,32
35	14,60	26,67	78	15,00	18,14	119	79,65	17,63
36	31,50	34,79	79	14,70	18,33	120	17,10	30,00
37	13,30	23,37	80	8,40	10,23	121	27,70	21,83
38	2,85	24,49	81	7,50	16,17	122	33,40	19,93
39	99,66	20,74	82	5,70	17,71	123	20,40	14,32
40	11,93	22,22	83	4,80	18,44	Total	2.154,69	

$P_{cuña}$ (%): Pendiente de la cuña; $S_{cuña}$ (m²): Superficie estable conseguida con la cuña de sedimentos



Siguiendo las indicaciones de López-Cadenas & Blanco (1968) se han conseguido 2.787,68 m² de superficie agroforestal estable sobre la que pueden asentarse cultivos sin problemas de que haya iniciación de procesos erosivos, y 5.150,30 m² de superficie estable sobre la que pueden extenderse pastizales (Tabla 4.74). Ambas superficies no existían con anterioridad a los diques construidos, lo cual es una prueba más del efecto beneficioso de estas obras.

Tabla 4.74. Superficie estable conseguida gracias a la cuña de sedimentación formada, para cada intervalo de pendiente

Destino	P_c (%)	N_c	S_c (m ²)	Observaciones
Cultivos	< 12%	32	2.787,68	No hay iniciación de erosión, puede establecerse cualquier cultivo
	12-18%	32	1.147,74	Pendiente de iniciación de la erosión
	>18%	49	1.303,82	Pendiente de arrastre total, no pueden establecerse cultivos
Pastizales	<30%	106	5.150,30	Pueden extenderse pastizales
	>30%	7	88,94	No pueden extenderse pastizales

P_c (%): Pendiente de la cuña; N_c : número de cuñas que conforman una superficie estable para cada intervalo de pendiente; S_c (m²): Superficie estable formada entre todas las cuñas en cada intervalo de pendiente



5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la efectividad de los diques de retención de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles, mediante una nueva metodología que mide con gran exactitud la cuña de sedimentos. Esto ha permitido extraer una serie de conclusiones que, para su mejor comprensión, se han agrupado en los siete apartados que aparecen a continuación y que comprenden tres categorías. En primer lugar las conclusiones que se refieren a la cantidad de sedimentos retenidos por los diques y a la estimación de esta cantidad por metodologías de comparación de la cuña de sedimentación con figuras geométricas; en segundo lugar, aquellas relativas a las tasas de erosión que se han obtenido a partir de la medición del volumen de la cuña; y por último, las conclusiones que se refieren a los cambios geomorfológicos que han experimentado las cárcavas y barrancos y sus implicaciones aguas abajo de la restauración.

5.1. VOLUMEN DE SEDIMENTOS RETENIDOS POR LOS DIQUES

1.- La metodología propuesta en este trabajo, basada en un levantamiento topográfico detallado de las cuñas, se muestra como un método de mayor exactitud que los métodos geométricos de uso frecuente, que ha permitido estimar con detalle un umbral mínimo de erosión en la zona.

2.- Con la aplicación de esta metodología se ha podido medir el volumen del 92% de los diques y se ha comprobado que se retienen en torno a 48 m^3 de sedimento por dique, aunque el rango oscila desde 1 hasta más de 1.500 m^3 .

3.- Existe una gran correlación positiva entre el volumen de la cuña de sedimentación y la superficie individual de la cuenca de aportación de cada dique. Es decir, los diques que poseen una mayor cuenca de aportación de sedimentos retienen mayores volúmenes de sedimentos, si bien la correlación es menos fuerte en aquellas zonas en que la superficie de aportación se encuentra cubierta de vegetación. Igualmente existe una alta correlación positiva con los parámetros geométricos de la cuña, medidos en campo, en concreto con la altura de aterramiento y la anchura de la cuña. También se observan correlaciones positivas con parámetros geométricos del dique tales como la longitud de coronación, la altura útil y la superficie de retención (producto de la longitud por la altura del dique). Sin embargo, las correlaciones son muy bajas, y estadísticamente no significativas, con la pendiente original y con el porcentaje actual de superficie cubierta de vegetación; esto es debido, probablemente, al desarrollo de la vegetación desde el momento de la repoblación forestal, de forma que en los primeros años, precisamente en aquellos en los que se han retenido la mayor parte de los sedimentos, la acción de la vegetación frente a la erosión ha sido reducida.

4.- La ecuación de regresión que relaciona el volumen de sedimentos con la superficie individual de la cuenca de aportación posee un buen ajuste y ofrece buenos resultados



en su aplicación para estimar el volumen de aquellos diques del área que presentan dificultades extremas para su medida.

5.- De acuerdo con las mediciones topográficas de los diques, más los volúmenes obtenidos de los diques que no se pudieron medir (8% de la muestra), se ha podido comprobar que los diques de Tórtolas han retenido casi 6.200 m³ de sedimentos en apenas cinco décadas.

6.- La ecuación de regresión que relaciona el volumen de sedimentos con la longitud de la cuña posee un buen ajuste, por lo que supone una útil herramienta para calcular el volumen de sedimentos en aquellos diques en que, por razones de accesibilidad o visibilidad, no es posible realizar todas las mediciones de campo necesarias por lo que no puede aplicarse la metodología de forma completa. Asimismo la ecuación puede ser aplicada en zonas próximas y/o similares al área de estudio, con unas sencillas mediciones de campo, de manera semejante a las metodologías más simples que asemejan la cuña a una figura geométrica.

7.- El volumen de sedimentos retenidos en una misma cárcava aumenta conforme se incrementa el número de diques construidos en esa cárcava. No obstante, esto no significa que sea necesario construir un mayor número de diques en cada barranco para retener la totalidad de sedimentos, ya que la eficacia de la retención se determina en función de la emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración.

5.2. ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTRAS METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN DEL VOLUMEN

8.- El volumen de la cuña de sedimentos estimado con la metodología propuesta en este trabajo es superior al obtenido por aplicación de dos frecuentes metodologías más simples que asemejan la cuña de sedimentos a un prisma de sección triangular (20% superior) y a una pirámide de base trapezoidal en posición horizontal (11% superior). Los resultados son especialmente diferentes al asemejar la cuña a un prismoide con secciones transversales en forma de V, resultando una aproximación poco exacta de la realidad de la cuña de sedimentación. Desde el punto de vista estadístico no existen diferencias significativas entre las tres metodologías, pero es necesario indicar que las metodologías han sido aplicadas a partir de datos medidos con instrumentos de una precisión mayor que los que usan los autores y que por tanto ofrecen mejores resultados que los que se obtendrían de una medición con menor nivel de detalle. Además, los autores emplean como altura del prisma o la pirámide la longitud de la cuña de sedimentos, cuando deberían emplear la longitud corregida por la pendiente de la cuña, en proyección horizontal. Esta incongruencia geométrica enmascara la diferencia real en el cálculo del volumen de sedimentos.

9.- La metodología propuesta permite un acercamiento más fiel a la realidad ya que ofrece soluciones de cálculo a situaciones particulares, tales como variaciones de la sección a lo largo de la cárcava o medición del volumen de sedimentos retenidos por



diques a los que confluyan varias cárcavas generando cuñas con dos colas o bifurcaciones.

10.- El análisis dique a dique de los resultados obtenidos por aplicación de las tres metodologías en valor absoluto para evitar que los positivos compensen con los negativos, ofrece mayores discrepancias, superándose los 1.500 m³ de sedimentos totales de diferencia entre la metodología propuesta y la que asemeja la cuña de sedimentos a un prisma de sección triangular (en torno al 20% de diferencia) y acercándose a los 600 m³ de diferencia con respecto a la metodología que asemeja la cuña a una pirámide de base trapezoidal (en torno al 11% de diferencia).

11.- La relación entre el volumen de sedimentos y la superficie individual de la cuenca de aportación, ofrece buenos ajustes de regresión lineal con las tres metodologías.

12.- Por último, el tiempo en la aplicación de la metodología propuesta es superior al necesario para aplicar otras metodologías más simples, debido principalmente a que emplea un número mayor de datos de campo, así como una medición aproximada de alguno de ellos. No obstante, el mayor tiempo necesario para la aplicación de la metodología propuesta queda justificado por una mejora en la precisión de los resultados, que permite estimar de forma más certera el volumen de sedimentos, y por tanto las tasas de erosión. Esto permite, además, obtener resultados más fiables para el análisis de la eficacia de las estructuras de retención.

5.3. MASA DE SEDIMENTOS RETENIDOS

13.- La estimación de la masa de sedimentos con las metodologías geométricas ofrece resultados inferiores (entre un 19% y un 11%) a los obtenidos con la metodología propuesta en este trabajo, aunque no se detectaron diferencias significativas salvo entre las desviaciones típicas de la metodología propuesta en este trabajo y la que asemeja la cuña a un prisma de sección triangular.

14.- La diferencia entre los métodos analizados aumenta con la masa de sedimentos, observándose grandes discrepancias en aquellos diques de mayores dimensiones y en aquellos que retienen elevadas cantidades de partículas. Por tanto, se concluye que las metodologías geométricas más simples de estimación de la cuña de sedimentación subestiman la eficacia de los diques de retención como medida para frenar la erosión.

15.- Entre los 123 diques de la restauración han retenido una elevada masa de sedimentos, que supera las 8.000 t. Los diques han evitado que esta cantidad de sedimentos haya sido transportada hacia los cauces situados aguas abajo de la zona de estudio y ha significado un importante control de sedimentos para la calidad del agua.



5.4. ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN RETENIDA

16.- La tasa de retención obtenida por aplicación de la metodología propuesta es, en el caso de estudio, superior que las obtenidas con las metodologías geométricas (un 18 % y un 13 % superior, respectivamente).

17.- Las tasas de erosión obtenidas por medición de los sedimentos retenidos en los diques de la restauración varían desde ligeras a moderadas. La tasa de erosión media supera en cuatro veces la tasa tolerable en Europa ($1,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

5.5. TASA DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS

18.- La tasa de emisión de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología propuesta en este trabajo para la estimación del volumen es inferior a la que se obtiene de la aplicación de las metodologías más sencillas, y estadísticamente significativa.

19.- Se puede afirmar que si no existiera la actual red de diques una gran cantidad de sedimentos habrían llegado al río Corneja, aguas abajo de la restauración, afectando a la calidad del agua. Los sólidos en suspensión habrían superado concentraciones superiores a $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ocasionando daños en el ecosistema fluvial, especialmente en las especies de salmónidos. En la actualidad la concentración media de sólidos en suspensión es apenas la cuarta parte del umbral máximo tolerable, por lo que las poblaciones trucheras poseen mejores condiciones de hábitat respecto a este parámetro.

20.- La tasa de emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración se ha reducido en un 91 % con respecto a la emisión de sedimentos existente previa a los trabajos de restauración hidrológico-forestal llevados a cabo por la Confederación Hidrográfica del Duero, lo que muestra una significativa eficacia en la retención de sedimentos hacia la red fluvial por parte de los diques.

21.- Asimismo, los diques han conseguido retener más de 6.000 m^3 , que de forma irremisible hubieran llegado a lo largo de los 50 años al embalse de Santa Teresa, siendo este uno de los efectos más positivos de estas hidrotecnias.

5.6. TASA TOTAL DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CORNEJA

22.- La tasa total de sedimentos obtenida con la metodología propuesta asciende a $5,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, valor superior al obtenido con las metodologías geométricas de estimación del volumen (un 18 % y un 12 % superior). Las diferencias entre metodologías son más amplias cuanto mayores son los volúmenes de las cuñas de sedimentación.



23.- Si bien estadísticamente no existen diferencias significativas entre las tres metodologías aplicadas y existe una buena correlación entre ellas, se ha comprobado que valores extremos de la tasa total de sedimentos obtenidos en diques con elevado volumen de sedimentos retenidos compensan con valores inferiores favoreciendo al resultado global, mientras que de forma individual las diferencias reales son notables.

24.- Las tasas de erosión obtenidas para la cuenca alta del río Corneja son elevadas y superan en un 14% el límite de pérdidas admisibles para suelos poco profundos, como son los presentes en la zona. Igualmente, pueden considerarse tasas no tolerables de acuerdo con los límites establecidos en Europa.

25.- Es de destacar que los resultados en cuanto a las tasas de retención, emisión y erosión total que se presentan en este trabajo son umbrales mínimos de erosión tanto por el periodo considerado para el cálculo, que se ha tomado el máximo posible en todos los casos por desconocerse el momento real de construcción de cada dique, como por los diques que sufren aterramiento total, ya que no se conoce el momento en que se produjo la colmatación. Por ello, presumiblemente, los efectos del proyecto de restauración han sido aún más positivos que los estimados en este trabajo.

5.7. CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS

26.- La reducción de la pendiente de las cárcavas es un importante efecto hidrogeomorfológico que ha tenido lugar gracias al proyecto de restauración hidrológico-forestal. En concreto, los diques de retención han conseguido suavizar las cárcavas y barrancos una media del 11 % consiguiendo una pendiente media del 17 %, lo cual es una muestra del efecto especialmente positivo de estas estructuras en la zona de estudio.

27.- La reducción de la pendiente es más notoria en los casos en los que la pendiente original era mayor. Además, cuanto mayor es la altura y la longitud de la cuña de sedimentos la pendiente conseguida es menor.

28.- Por otra parte, mayores pendientes generan mayores tasas de emisión de sedimentos aguas abajo de la construcción de las estructuras de retención. Asimismo, las tasas de erosión son mayores con pendientes más elevadas, debido probablemente a que la energía de transporte de sedimentos y la energía de escorrentía se ve incrementada con relieves escarpados.

29.- A partir de una muestra importante de diques, se ha obtenido una ecuación que relaciona la pendiente conseguida con la pendiente original, la altura del aterramiento y la longitud de la cuña de sedimentación. Esta ecuación es de gran utilidad ya que permite estimar las pendientes a conseguir mediante el empleo de estas estructuras en zonas con texturas principalmente arenosas y clima mediterráneo continental para



utilizarlas al máximo de su rendimiento y por tanto minimizando los costes necesarios para su construcción.

30.- Por último, las cuñas de sedimentación formadas tras los diques de la restauración han conseguido estabilizar los taludes y recuperar una amplia superficie agroforestal estable de casi una hectárea (8.000 m²), apta para establecerse cualquier cultivo, ya que las pendientes conseguidas aseguran que no hay problemas de iniciación de procesos erosivos. El establecimiento de estas nuevas áreas agroforestales constituye otro importante efecto positivo de los diques.

5.8. CONCLUSIÓN FINAL

La metodología que se presenta en este trabajo, con mediciones de campo de detalle, permite estimar con una gran exactitud el volumen de sedimentos retenidos en los diques empleados en los proyectos de restauración hidrológico-forestal y, consecuentemente, las tasas de erosión y la movilización de sedimentos hacia los cauces de una cuenca. La mejor evaluación de la retención de los sedimentos permite deducir importantes efectos positivos, ya que se conoce mejor la reducción efectuada en la cantidad de sólidos en suspensión presentes en los cauces y compararlos adecuadamente con los valores tolerables para la fauna piscícola y/o que ocasionan el aterramiento de los embalses.

Tras el estudio realizado se puede concluir que los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles han desarrollado hasta el momento un papel muy eficaz y positivo en el control y retención de sedimentos en las pequeñas cuencas de cárcavas y barrancos donde se ubican. Así mismo, se ha demostrado que los diques de retención producen beneficiosos cambios en la geomorfología de los cauces, que se concreta en una notable reducción de la pendiente original de los terrenos degradados, y un mayor acercamiento a la que tuvieron los terrenos con su morfología natural. Gracias a la estimación de la pendiente conseguida se pueden extraer conclusiones sobre el diseño, emplazamiento y ejecución de estas obras y los cambios geomorfológicos que provocan, que además de estabilizar las laderas vertientes, recuperan parte de una superficie de plantación de la que no se disponía desde hace cientos de años.



6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Cualquier trabajo de investigación, además de realizar aportaciones al campo de conocimiento al que pertenece, crea nuevas preguntas, ideas o vías de investigación. A continuación se presentan las ideas surgidas en el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, sería interesante realizar una comparación de la metodología propuesta con otras metodologías surgidas con posterioridad al desarrollo de este trabajo y éstas, asimismo, con las metodologías que se han aplicado en este trabajo para su comparación.

Puede ser útil extender la aplicación de esta metodología a otras zonas de diferentes características a las de la zona de estudio, con clima más extremo y texturas más finas y estimar el efecto de los diques de retención bajo estas condiciones. Un análisis comparativo podría extraer nuevas conclusiones sobre el efecto de los diques de retención.

Además, se podría aplicar la metodología propuesta en base a otras técnicas basadas en distanciómetros láser y escáneres de terreno. El empleo de GPS de precisión centimétrica quedaría descartado en zonas con gran espesura de la vegetación por la pérdida de precisión, pero en algunos casos podría utilizarse. De esta forma se puede analizar si un cambio en la instrumentación empleada supone un cambio en los resultados o si bien la precisión obtenida con estación total es suficiente para obtener una medición precisa. Los factores tiempo y presupuesto podrían ser los determinantes a la hora de decidir el instrumento a emplear para la aplicación de la metodología.

Otra forma de estimar las tasas de erosión se basa en el estudio de cárcavas que en la actualidad están totalmente degradadas y en las que no se ha llevado a cabo ninguna actuación (ni reforestación de la cuenca ni construcción de estructuras de retención), ya que el volumen de la cárcava desnuda se corresponde con volumen de sedimentos emitidos. Llevar a cabo este estudio puede resultar interesante para comparar los resultados que se extraigan con los obtenidos en este trabajo.

Un trabajo importante para la extracción de conclusiones en cuanto a la emisión de sedimentos aguas abajo de la restauración sería la medición directa de los sólidos en suspensión en los cursos de agua afectados, así como la cuantificación directa del efecto de estas partículas sobre las poblaciones piscícolas.

Por otro lado, siguiendo otra línea de investigación, la cuña de sedimentos puede proporcionar información adicional a la recogida en este trabajo: información sobre la retención de nutrientes en los sedimentos. De esta forma se puede conocer la pérdida de fertilidad de los suelos debido a la erosión y su relación con los cambios en los usos del suelo sufridos por la zona de estudio. El estudio de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en la cuña de sedimentos es importante para así conocer la capacidad



de estas nuevas superficies creadas (de menor pendiente) para recoger tierras de cultivo.

En esta línea, la erosión del suelo tiene un fuerte impacto en el ciclo de carbono global. La función de los diques de retención en la captura de carbono a través del estudio de la materia orgánica existente en los sedimentos retenidos ha sido muy poco analizada. Este estudio podría poner de manifiesto la necesidad de adoptar medidas de conservación eficaces, capaces de reducir los riesgos de la emisión de carbono a la atmósfera y de secuestrar carbono en el suelo y la biota.

Por último, es importante señalar que se está trabajando en publicaciones derivadas de este estudio y que siguen esta línea de investigación ya iniciada. Muestra de ello son las publicaciones incluidas en el Anexo IV.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedini, M.; Md Said, M.A.; Ahmad, F.; 2012. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin). *Catena*, 97: 63-70.
- Ackermann, W. C.; Corinth, R. L.; 1962. An empirical equation for reservoir sedimentation, in Symposium of Bari (Italy). *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 59: 359-366. Bari (Italy).
- Alabaster, J.S.; Lloyd, R.L.; 1980. *Water quality criteria for freshwater fish*. Butterworths, London, 297 pp.
- Alatorre, L. C., Beguería, S.; García, J. M.; 2010. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *J. Hydrol.*, 391: 109-123.
- Alfonso, C.; 2005. Desertificación: problemática y soluciones. *Ambienta*, 47: 22-25.
- Allué, J.L.; 1990. *Atlas fitoclimático de España. Taxonomías*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid.
- Almorox, J.; De Antonio, R.; Saa, A.; Díaz, M.C.; Gascó, J.M.; 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, Madrid.
- Amado, X.; 1997. La aplicación del GPS a la arqueología. *Trabajos de prehistoria*, 54(1): 155-165.
- Angstrom, A.; 1936. A coefficient of humidity of general applicability. *Geografiska Annaler*, 18: 245-254.
- Arnoldus, H.M.J.; 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. *FAO conservation Guide*, 1: 99-104.
- Avendaño, C.; Cobo, R.; Gómez, J.; Sanz, M.; 1995. Procedimiento para evaluar la degradación específica (erosión) de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles. *Ingeniería Civil*, 99: 51-58.
- Avendaño, C.; Cobo, R.; Sanz, E.; Gomez, J.L.; 1997a. Capacity situation in Spanish reservoirs. *Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages. Commission Internationale Des Grands Barrages*. 849-862, Florencia.
- Avendaño, C.; Cobo, R.; Sanz, E.; Gomez, J.L.; 1997b. Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area. *Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages. Commission Internationale Des Grands Barrages*. 863-874, Florencia.
- Azcarretazábal, D.; 1964. *Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca río Corneja. Tramo I. Término municipal de Tórtoles*. Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Obras Públicas.
- Barranco, D.; 1993. *En busca de las raíces de Villanueva del Campillo*. Institución Gran Duque de Alba. Ávila.
- Barranco, D.; 1997. *Una aproximación histórica a dos comunidades de villa y tierra abulenses: la episcopal Bonilla y la señorial Villatoro*. Institución Gran Duque de Alba Ávila.



- Bellin, N.; Vanacker, V.; Van Wesemael, B.; Solé, A.; Bakker, M.; 2011. Natural and anthropogenic controls on soil erosion in the Internal Betic Cordillera (southeast Spain). *Catena*, 87: 190-200.
- Belmonte, F.; Romero, A.; Martínez, M.; 2005a. Erosión en cauces afectados por obras de corrección hidrológica (Cuenca del Río Quípar, Murcia). *Papeles de Geografía*, 41-42: 71-83.
- Belmonte, F.; Romero, A.; Martínez, M.; 2005b. Impactos ambientales asociados a la construcción de obras de corrección hidrológica en la Cuenca del río Quípar (Sureste de España): apertura de caminos de acceso. *Cuadernos de investigación geográfica*, 31: 97-106.
- Belmonte, F.; Romero, A.; 2009. Erosive and environmental impact of hydrological correction check dam. En: Hayes, W.P. & Barnes, M.C. (Eds). *Dams: impacts, stability and design*. Nova Science Publishers. New York. 161-178.
- Benito, G.; Gutiérrez, M.; Sancho, C.; 1992. Erosion rates in badland areas of the central Ebro basin (NE Spain). *Catena*, 19: 269-286.
- Bennet, H.H.; 1939. *Soil Conservation*. Mc Graw-Hill Co. New York. 993 pp.
- Bertoni, J.; Lombardi, F.; 1985. *Conservação do solo*. Livroceres, Piracicaba. 392 pp.
- Beschta, R.L.; 1979. Debris removal and its effects on sedimentation in an Oregon Coast Range stream. *Northwest Science*, 53: 71-77.
- Bilotta, G.S.; Brazier, R.E.; 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res.* doi: 10/1016/j.watre.2008.03.018.
- Bilotta, G.S.; Brazier, R.E.; Haygarth, P.M.; 2007. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in Agronomy*, 94: 237-280.
- Birkinshaw, S.J.; Bathurst, J.C.; 2006. Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 750-761.
- Bochet, E.; García, P.; Tormo, J.; 2010. How can we control erosion of loadslopes in semiarid mediterranean areas? Soil improvement and native plant establishment. *Land Degrad. Develop.*, 21: 110-121.
- Boix-Fayos, C.; González, G.; López, F.; Castillo, V.M.; 2007. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of The Rogativa Catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology*, 91: 103-123.
- Boix-Fayos, C.; de Vente, J.; Martínez, M.; Barberá, G.G.; Castillo, V.; 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol. Process.* 22: 4922-4935.
- Bombino, G.; Tamburino, V.; Zimbone, S.M.; 2006. Assessment of the effects of check-dams on riparian vegetation in the mediterranean environment: a methodological approach and example application. *Ecological engineering*, 27: 134-144.
- Brandt, S.A.; 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40: 375-401.
- Brookes, A.; 1986. Response of aquatic vegetation to sedimentation downstream from river channelization works in England and Wales. *Biological Conservation*, 38: 352-367.



- Brown, C.B.; Jarvis, C.S.; 1943. Discussion of Sedimentation in reservoirs. By J. Witzig. *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 69: 1493-1500.
- Brune, G.M.; 1953. Trap efficiency of reservoirs. *Trans. Am. Geophys. Union*, 34: 407-418.
- Bruton, M.N.; 1985. The effects on suspensoids on fish. *Hydrobiologia*, 125: 221-241.
- Bryan, R.B.; Yair, A. (Eds.); (1982). *Badland geomorphology and piping*. GeoBooks, Norwich. 408 pp.
- Bull, L.J.; Kirkby, M.J.; Shannon, J.; Hooke, J.M.; 2000. The impact of rainstorms on floods in ephemeral channels in southeast Spain. *Catena*, 38(3): 191-209.
- Bussi, G.; Rodríguez, X.; Francés, F.; Benito, G.; Sánchez, Y.; Sopeña, A.; 2013. Sediment yield model implementation based on check dam infill stratigraphy in a semiarid Mediterranean catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17: 3339-3354.
- Callander, R. A.; Duder, J. N.; 1979. Reservoir sedimentation in the Rangitaiki River. *New Zealand Engineering*, 34: 208-215.
- Campbell, I.A.; 1997. Badlands and badland gullies. En: Thomas, D.S.G. (Ed.), *Arid Zone Geomorphology*. Belhaven Press, London: 159-183
- Campbell, D.J.; Henshall, J.K.; 1990. Bulk density. En: Smith, K.A.; Mullins, C.E. (Eds) *Soil Analysis: Physical Methods*, 329-366. Malcel Dekker, Nueva York.
- Cantero, A.; 2003: Socio-economía y paisaje forestal de la Sierra de Gredos. El caso de El Arenal (Ávila). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 16: 309-313.
- Cantero, A.; 2011. Construcción de pequeños diques de trozas en el hayedo de Iturrigorri (Oñati, Guipúzcoa). *Montes*, 107: 17-20.
- Cantón, Y.; 1999. *Efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en paisajes de cárcavas*. Consejo superior de Investigaciones Científicas. Tesis doctoral.
- Cantón, Y.; Domingo, F.; Solé, A.; Puigdefábregas, J.; 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 252: 65-84.
- Casali, J.; López, J.J.; Giráldez, J.V.; 1999. Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra (España): Descripción y cuantificación. *Ingeniería del Agua*, 6(3): 251-258.
- Casali, J.; Bennet, S.J.; Robinson, K.M.; 2000. Processes of ephemeral gully erosion. *International Journal of Sediment Research*, 15: 31-41.
- Casanova, L.; 2002. Topografía Plana. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de vías. Venezuela.
- Castillo, V.M.; Mosch, W.; Gonzalez, G.; Lopez, F.; 2001. Efectos de los diques de corrección hidrológico-forestal en la geomorfología de barrancos y ramblas. *III Congreso Forestal Español*. Granada.
- Castillo, V.; González, G.; Mosch, W.; Navarro, J.A.; Conesa, C.; López-, F.; 2002. *Seguimiento y evaluación de los efectos sobre el medio natural de la sequía y los procesos erosivos en la Región de Murcia*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, 167-233.



- Castillo, V.M.; Mosch, W.; Conesa, C.; Gonzalez G.; Navarro, J.A.; López, F.; 2007. Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena*, 70: 416-427.
- Castillo, V.M.; Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; Martinez, M.; González G.; 2008. Efectos del aumento de la cubierta vegetal y los diques de corrección en la producción de sedimentos de cuencas mediterráneas. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*.
- Catella, M.; Paris, E.; Solari, L.; 2005. Case study: Efficiency of slit-check dams in the Mountain region of Versilia Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145-152.
- Cerdà, A.; 2001. La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 10 (3): 1697-2473.
- Cerdà, A.; García-Fayos, P.; 1995. Relaciones entre las pérdidas de agua, suelo y semillas en zonas acaravadas. Influencia de la pendiente. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 20-21: 47-63.
- Cerdà, A.; Navarro, R.; 1997. Procesos de erosión en los badlands alicantinos. *Investigaciones geográficas*, 17: 99-116.
- Chapman, D.W.; 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society*, 117: 1-21.
- CHD; 2011a. Apéndice 3: Series de aportaciones por masa (ficheros excel). DU-622: Río Corneja desde cabecera hasta confluencia con el río Pozas, y arroyo de Puerto Chía. <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico2009/PropuestaPlanHidrol%C3%B3gico/Anejo2Inventrech%C3%ADdricos/Anejo2SeriespormasaFicherosexcel/tabid/516/Default.aspx>.
- CHD; 2011b. Anejo 14: Atlas de Mapas. Mapa 1: Ámbito territorial de la demarcación hidrográfica internacional del Duero. <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico2009/PropuestaPlanHidrol%C3%B3gico/Anejo14Atlasdemapas/tabid/501/Default.aspx>.
- CHD; 2011c. Anejo 14: Atlas de Mapas. Mapa 6: Red fluvial identificada a escala 1:25.000. <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico2009/PropuestaPlanHidrol%C3%B3gico/Anejo14Atlasdemapas/tabid/501/Default.aspx>.
- CHD; 2013. ICA Water quality network. Water quality for waters with special protection for fish life. <http://www.chduero.es/Inicio/ElaguaenlacuenaCalidad/Redesdecontroldecalidad/Aguassuperficiales>
- CHD; 2014a. Altas de mapas. <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico2009/PropuestaPlanHidrol%C3%B3gico/Anejo14Atlasdemapas/tabid/501/Default.aspx>
- CHD; 2014b. Infraestructuras. <http://www.chduero.es/Inicio/Infraestructuras/EmbalsesdelEstadoenlacuena/tabid/147/Default.aspx>
- CHD; 2014c. Redes de control de la calidad. <http://www.chduero.es/Inicio/ElaguaenlacuenaCalidad/Redesdecontroldecalidad/Aguassuperficiales/tabid/172/Default.aspx>



- Chanson, H.; 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Chien, N.; 1985. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 143-159.
- Chirino, E.; Bellot, J.; Bonet, A.; Andreu, J.M.; 2003. Efecto de diferentes tipos de cubierta vegetal en el control de la erosión en clima semiárido. SE - España. *Edafología*, 10 (3): 39-48.
- Ciccacci, S.; Galiano, M.; Roma, M.A.; Salvatore, M.C.; 2008. Morphological analysis and erosion rate evaluation in badlands of Radicofani area (Southern Tuscany — Italy). *Catena*, 74-2: 87-97.
- Clarke, M.L.; Rendell, H.M.; 2006. Process-form relationships in southern Italian badlands: erosion rates and implications for landform evolution. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31: 15-29.
- Clarke, M.L.; Rendell, H.M.; 2010. Climate-driven decrease in erosion in extant Mediterranean badlands. *Earth Surf. Process. Landforms*.
- Clotet, N.; Gallart, F.; Sala, M.; 1987. Los badlands, características, interés teórico, dinámica y tasas de erosión. *Notas de Geografía Física*, 15-16: 28-37.
- Coats, R.; Collins, L.; Florsheim, J.; Kaufman, D.; 1985. Channel change, sediment transport, and fish habitat in a coastal stream: Effects of an extreme event. *Environmental Management*, 9: 35-48.
- Collins, A.L.; Walling, D.E.; 2007. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology*, 88: 120-138.
- Collins, A.L.; Walling, D.E.; Peet, L.; 2008. Identifying gravel siltation sources. *Salmo Trutta*, 11: 26-28.
- Conesa, C.; 2004. Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. *Nimbus*, 13-14: 125-132.
- Conesa, C.; 2005. Les "ramblas" du Sud-est Espagnol: Systèmes hydromorphologiques en milieu méditerranéen sec. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49(2): 205-224. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Conesa, C.; García, R.; 2007a. *Erosión y diques de retención en la Cuenca Mediterránea. Efectividad hidrogeomorfológica de los diques de retención en cuencas torrenciales del Sureste Español*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua.
- Conesa, C.; García, R.; 2007b. Litofacies de relleno y modelo de sedimentación de los diques de retención en el tramo inferior de la Rambla del Cárcavo (Cuenca del Segura). *Rev. C & G.*, 21 (3-4): 77-100.
- Conesa, C.; García, R.; 2009. Local scour estimation at check dams in torrential streams in south east Spain. *Geogr. Ann.*, 91 A(3): 159-177.
- Conesa, C.; Arana, R.; García, R.; 2009. Variación granulométrica y mineralógica en profundidad de los sedimentos retenidos por diques. Estudio en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular. *Nimbus*, 23-24, 61-88.



- Cordone, A. J.; Kelley, D. W.; 1961. The influences of inorganic sediment on the aquatic life of a stream. *California Fish and Game*, 47: 189-228.
- Cruz, V.; 2011. Estudio de la efectividad de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila). Proyecto Fin de Carrera. Universidad Católica de Ávila. Ávila.
- Dantin, J.; Revenga A.; 1941. Las líneas y las zonas ixóseras de España, según los índices termopluviométricos. Avance al estudio de la aridez en España. *Estudios Geográficos*, II: 35-91.
- Davies, R.J.; Hickey, C.W.; Quinn, J.M.; Ryan, P.A.; 1992. Effects of clay discharges on streams: 1. Optical properties and epilithon. *Hydrobiologia*, 248: 215-234.
- De Alba, S.; 1998. Procesos de degradación del suelo por erosión en sistemas agrícolas de ambiente mediterráneo en el centro de España. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, 590 pp.
- De Vente, J.; 2009. *Soil Erosion and Sediment Yield in Mediterranean Geoecosystems*. Faculteit Wetenschappen. Katholieke Universiteit Leuven. Tesis doctoral. 264 pp.
- De Vente, J., Poesen, J.; Verstraeten, G.; 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *J. Hydrol.*, 305: 63-86.
- De Vente, J.; Poesen, J.; Arabkhedri, M.; Verstraeten, G.; 2007. The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*, 31: 155-178.
- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A.; Govers, G.; 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain, *Global Planet. Change*, 60: 393-415.
- Del Palacio, E.; 1999. *La restauración hidrológico-forestal. Gestión sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación. O.A. Parques Nacionales*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Del Palacio, E.; 2002. *Las ramblas: los ríos invisibles. La restauración hidrológico-forestal de ramblas en el ámbito mediterráneo*. O.A. Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Del Palacio, E. (Coord.); 2013. *Cien años de restauración hidrológico-forestal*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- De Simón, E.; Mintegui, J.A.; Garcia, J.L.; Robredo, J.C.; 1993. *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea. Información Técnica N° 22/93*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. 325 pp.
- Del Ser, G.; 1998. *Documentación medieval en los archivos municipales abulenses*. Institución Gran Duque de Alba. Ávila.
- Desir G.; Marín C.; 2009. Caracterización de la erosión en áreas acarcavadas de la FM. Tudela (Bárdenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2): 195-213.
- Díaz, V.; 2011a. *Efecto de los diques forestales en la retención de sedimentos*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Valladolid. Palencia.



- Díaz, V.; 2011b. Estudio del efecto de los diques forestales en la retención de sedimentos. Trabajo de Investigación Tutelada. Máster en Investigación en Ingeniería para el Desarrollo Agroforestal. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; Ramos, I.; 2012. Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales. En: *Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 2012)*. ISBN: 978-84-695-6377-9.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2014. Propuesta de una nueva metodología para determinar la efectividad de los diques en la retención de sedimentos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40 (1): 169-190.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2014b. Topographical surveying for improved assessment of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badlands restoration site (Central Spain). *Journal of Soils and Sediments*. DOI 10.1007/s11368-014-0958-5. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11368-014-0958-5>
- Doeg, T.J.; Koehn, J.D.; 1994. Effects of draining and desilting a small weir on downstream fish and macroinvertebrates. *Regulated Rivers Research and Management*, 9: 263-278.
- Duck, R.; McManus, J.; 1993. Sedimentation in natural and artificial Impoundments: an indicator of evolving climate, land use and dynamic conditions. En: Mc Manus J. & Duck R. (Ed.): *Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs*. Wiley.
- Edwards, D.; 1969. Some effects of siltation upon aquatic macrophyte vegetation in rivers. *Hydrobiologia*, 34: 29-37.
- Ellison, W.D.; 1947. Soil erosion studies - Part I: Agric. Eng. 28: 145-146.
- Emberger, L.; 1932. Sur une formule climatique et ses applications en botanique. *La meteorology*: 423-432.
- Ertsen, M.; Prieto, D.; Van De Giesen, N.; 2007. Hydrological interdependencies of irrigation systems and river catchments. Reducing the Vulnerability of Societies to Water Related Risks at the Basin Scale. *Proceedings of the third International Symposium on Integrated Water Resources Management*, Bochum, Germany. IAHS Publ. 317.
- Fang, R.; 1999. Outlook of the check-dam system agriculture in Shanxi Province. *Soil Water Conserv. China* 169: 4-7.
- Farnham, C. W.; Beer, C. E.; Heinemann, H.; 1966. Evaluation of factors affecting reservoir sediment deposition, in Symposium of Garda (Italy): Hydrology of Lakes and Reservoirs. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 747- 758, Garda (Italy).
- FAO; 1979. *A provisional methodology for soil degradation assessment*. Roma.
- FAO; 1981. *World soil charter*. Food and Agriculture Organization. Roma.
- FAO; 1992. *Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Boletín de suelos de la FAO. FAO.
- FAO; 1995. *Land and water integration and river basin management. Chap.: Conjunctive use of surface and groundwater*. FAO Land and Water Bulletins.
- FAO; 2000. *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Boletín de aguas y tierras de la FAO. FAO.



- Faustino, J.; 1985. *CATIE. Proyecto regional de manejo de cuencas. Conservación de suelos*. Curso de capacitación. Panamá.
- Federacafé (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia); 1975. *Manual de conservación de suelos de ladera*. Centro Nacional de Investigaciones del Café. Chinchiná (Colombia).
- Fernández_Ontoño, E.; Rojo, L.; Jiménez, M.N.; Navarro, F.B.; Díez, M.; Martín, F.; Fernández, J.; Martínez, F.J.; Roca, A.; Aguilar, J.; 2010. Afforestation improves soil fertility in south-eastern Spain. *Eur. J. Forest. Res.*, 129:707-717.
- Ferrer, M.; 2009. La restauración hidrológico-forestal. *Foresta*, 43: 181-185.
- Forsythe, P.; 1985. Performance of a grade control structure system during extreme floods. *American Society of Agricultural Engineers Winter Meeting*, Chicago IL.
- Foster, G. R.; 1986. Understanding ephemeral gully erosion. En *Soil Conservation. Assessing the National Resources Inventory*, 2: 90-125. Committee on Conservation Needs and Opportunities. Board on Agriculture. National Research Council. National Academy Press, Washington D. C.
- Foster, I.; Walling, D.; 1994. Using reservoir deposits to reconstruct changing sediment yields and sources in the catchment of the Old Mill Reservoir, South Devon, UK, over the past 50 years. *Hydrolog. Sci. J.*, 39: 347-368.
- Gallart, F.; 1992. Estudi Geomorfològic de la Conca d'Odena. L'Estrat 3 (monogràfic), 9–45.
- Gallart, F.; 2009. Algunos criterios topográficos para identificar el origen antrópico de cárcavas. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 35 (2), 215–221.
- Gallart, F.; Marignani, M.; Pérez-Gallego, N.; Santi, E.; Maccherini, S.; 2013. Thirty years of studies on badlands, from physical to vegetational approaches. A succinct review. *Catena*, 106: 4–11.
- Gandullo, J.M.; 1985. *Ecología Vegetal*. Ed. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- Gandullo, J.M.; Serrada, R.; 1977. *Mapa de Productividad potencial de la España Peninsular*. INIA. Madrid.
- García-Nájera, J.M.; 1943. *Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid. 297 pp.
- García-Nájera, J.M.; 1954. *Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración)*. I.F.I.E. Madrid, 29 pp.
- García, J.N.; Puigdefábregas-Tomás, J.; 1985. Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del pirineo central. *Cuadernos de investigación geográfica*, 11: 91-102.
- García, J.M.; White, S.; Martí, C.; Valero, B.; Errera, M.P.; Gómez-Villar, A.; 1996. *La catástrofe del Barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio temporal*. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones científicas. Zaragoza.
- Gausson, H.; 1954. *Les possibilités forestières du monde en relación avec le climat*. Actes du Congrès IVE Mundial forestier, vol. III. Dehra Dun.



- GCMD; 2011. The Global Assessment of Human Induced Soil Degradation (GLASOD) Digital Database from UNEP/GRID-Geneva. http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_GNV00018_171.html. Fecha de consulta: 25 de abril de 2011.
- Geiger, A. F.; 1957. Sediment yields from small watersheds in the United States. *11th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, 1: 269-276. Toronto (Canada).
- Génova, M. Gómez, F.; Morla, C.; 2009. *Los bosques de Gredos a través del tiempo*. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- Gil, R. (Coord.); 2004. *Restauración hidrológico-forestal: Pasado, presente y futuro*. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid.
- Giordano, A.; Marchisio, C.; 1989. Analysis and correlation of the existing soil erosion maps in the Mediterranean Coastal Zones. *PAP*. Málaga.
- Gómez, D.; Segura, R. (Coord); 2007. *La agricultura y sus efectos en los ríos*. Estrategia Nacional de restauración de ríos. Ministerio de Medio Ambiente.
- Gómez, A.; Schnabel, S.; Lavado, F.; 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 55: 59-80.
- González, E.; Holgado, A.; Martínez, A.; Gómez, M.; 2005. Agricultura de Conservación en Europa. Situación actual y perspectivas. *Agroinformación.com*. <http://www.agroinformacion.com/leerarticulo.aspx?-not=479>. Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2005.
- González-Pelayo, O.; Andreu, V.; Gimeno-García, E.; Campo, J.; Rubio, J.L.; 2010. Effects of fire and vegetation cover on hydrological characteristics of a Mediterranean shrubland soil. *Hydrological Processes*, 24: 1504-1513.
- Goodwin, C.; Michaelis, D.; 1984. Appearance and water quality of turbidity plumes produced by dredging in Trampa Bay, Florida. *US Geological Survey Water-Supply Paper*, 2192.
- Götz, A.; 2001. *Flood protection: a common goal for federal, cantonal and municipal authorities*. Federal Office for Water and Geology.
- Gray, L.J.; Ward, J.V.; 1982. Effects of sediment releases from a reservoir on stream macroinvertebrates. *Hydrobiologia*, 96: 177-184.
- Greig, S.M.; Sear, D.A.; Carling, P.A.; 2005. The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: Implications for sediment management. *Science of the Total Environment*, 344: 241-258.
- Griffiths, P.G.; Hereford, R.; Webb, R.H.; 2006. Sediment yield and runoff frequency of small drainage basins in the Mojave Desert, U.S.A. *Geomorphology*, 74: 232-244.
- Haregeweyn, N.; Poesen, J.; Nyssen, J.; Govers, G.; Verstraeten, G.; de Vente, J.; Deckers, J.; Moeyersons, J.; Haile, M.; 2008. Sediment yield variability in Northern Ethiopia: a quantitative analysis of its controlling factors. *Catena*, 75: 65-76.
- Harrison, E.T.; Norris, R.H.; Wilkinson, S.N.; 2007. The impact of fine sediment accumulation on benthic macroinvertebrates: implications for river management. En: Wilson, A.L., Dehaan,



- R.L., Watts, R.J., Page, K.J., Bowmer, K.H., & Curtis, A. *Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference. Australian rivers: making a difference*. Charles Sturt University, Thurgoona, New South Wales.
- Heaney, S.I.; Foy, R.H.; Kennedy, G.J.A.; Crozier, W.W.; O'Connor, W.C.K.; 2001. Impacts of agricultural on aquatic systems: lesson learnt and new unknowns in Northern Ireland. *Mar. Freshw. Res.*, 52: 151-163.
- Heede, B.H.; Mulich, J.G.; 1973. Functional relationships and a computer program for structural gully control. *Journal of Environmental Management*, Vol. 1.
- Hernández-Laguna, E.; Martínez, M.; Romero, A.; 2004. Método de determinación del volumen de sedimentos retenidos en diques de corrección hidrológica. En: Benito, G.; A. Díez Herrero (Eds). *Riesgos Naturales y Antrópicos, en Geomorfología*. SEG y CSIC, Vol. 1: 201-210. VIII Reunión Nacional de Geomorfología. Toledo.
- Herráez, F.; Díaz, V.; 2011. *Vías Forestales*. Universidad Católica de Ávila. Ávila.
- Hogg, I. D.; Norris, R. H.; 1991. Effects of Runoff and Land Clearing and Urban Development on the Distribution and Abundance of Macroinvertebrates in Pool Areas of a River. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 42: 507-518.
- Hooke, J.M.; 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79: 311-335.
- Hudson, N.W.; 1963. Gully control in Mopani Soils. *Rhodesia Agricultural Journal*, 60, 1: 22-31.
- Hudson, N.W.; 1971. *Soil conservation*. Batsford. London.
- Hudson, N.W.; 1982. *Conservación del suelo*. Editorial REVERTÉ. Barcelona.
- Hynes, H. B. N.; 1970. *The ecology of running waters*. Liverpool: Liverpool University Press.
- Ibáñez, J.J.; Jiménez Ballesta, R.; Conde, P.; 2003. Degradación de suelos por efecto antrópico en la región mediterránea. En: Bienes, R.; Marqués, R.J. (Eds.). *Perspectivas de la degradación del suelo*. Forum Calidad. Madrid.
- ICONA; 1983-1988. *Mapa de estados erosivos*. ICONA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). Madrid.
- ICONA; 1990. *Clasificación General de los Montes Públicos, 1859*. Madrid, Imprenta nacional, 1859. Reedición facsímil del ICONA, Madrid.
- ICONA; 1991. *Catálogo de los Montes Públicos Exceptuados de la Desamortización, 1862*. Reedición facsímil del ICONA, Madrid.
- ICONA; 1993. *Catálogo de los Montes y demás Terrenos Forestales Exceptuados de la Desamortización por Razones de Utilidad Pública, 1901*. Reedición facsímil del ICONA, Madrid.
- IGME; 1989. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Instituto Tecnológico Geominero de España. 332 pp.
- IGME; 2008. *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 529: Santa María del Berrocal*. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Industria. Dirección General de Minas.
- IGN; 2011. *Visor IBERPIX. Cartografía del Instituto Geográfico Nacional. Tórtolas, año 2005*.



- IGN; 2013. Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:50000 de la hoja nº 529 (Santa María del Berrocal) Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IGN; 2014. *Mapa de suelos de España. Tórtoles (Ávila)*. <http://www.idee.es/clientesIGN/wmsGenericClient/index.html?lang=ES>. Fecha de consulta: 15 de Julio de 2014.
- JCYL; 2001: *Catálogo de los montes de utilidad pública de la provincia de Ávila*. Junta de Castilla y León. Zamora.
- Jolly, J.; 1982. *A proposed method for accurately calculating sediment yields from reservoir deposition volumes*. Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS Publ. No 37.
- Johnson, J.W.; Minaker, W.L.; 1944. Movement and deposition of sediment in the vicinity of debris-barriers. *Transactions, American Geophysical Union*, Part VI, 901-905.
- Kelley, H.W.; 1990. *Keeping the land alive*. FAO Soils Bulletin 50. Roma.
- Lal, R.; Stewart, B. A.; 1995. *Soil Management, Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. Lewis Publisher CRC Press. Florida, USA.
- Landaeta, C.J.; 1995. Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga del material dragado. *Instituto Nacional de Canalizaciones. Dirección de Proyectos e Investigación*, Caracas - Venezuela.
- Lang, R.; 1915. Versuch einer exakten Klassifikation der Boden in klimatischer Hinsicht. *Int Mitt für Boden-kunde*, 5: 312-346.
- Le Roux, J.; Roos, Z.; 1982. The rate of soil erosion in the Wuras Dam catchment calculated from sediments trapped in the dam. *Z. Geomorphol, Suppl.*, 26: 315-329.
- León, J.D.; 2005. Estrategias para el control y manejo de la erosión en cárcavas. En: *Cuadernos Ambiental*, 2: 88-101. Posgrados de Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.
- Li, Z.; 1995. Construction and outlook analysis for check-dams in the Loess Plateau. *J. Soil Water Conserv.*, 4, 44.
- Lien, H.P.; 2003. Design of slit dams for controlling stony debris flow. *International Journal of Sediment Research*, 18: 74-87.
- López-Alonso, R.; 1997. Corrección de cauces torrenciales. *Cimbra*, 319: 10-13.
- López-Bermúdez, F.; Torcal, L.; 1986. Procesos de erosión en tunel (piping) en cuencas sedimentarias de Murcia (España). Estudio preliminar mediante difracción de rayos x y microscopio electrónico de barrido. *Papeles de geografía física*, 11: 7-20.
- López-Bermúdez, F.; 2008. *Desertificación: Preguntas y respuestas a un desafío económico, social y ambiental*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- López-Cadenas, F.; Blanco, M.; 1968. *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales*. I.F.I.E. Madrid, 187 pp.
- López-Cadenas, F.; Romero, A.; 1998. Erosión y desertificación: Implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de geografía*, 28: 77-89.
- López-Cadenas, F. (Dir.); 1988. *Corrección de torrentes y estabilización de cauces*. FAO.



- López-Cadenas, F. (Dir.); 1998. *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión*. Ministerio de Medio Ambiente, TRAGSA, TRAGASATEC y Mundi-Prensa, Madrid, 945 pp.
- López-Cadenas, F.; 2003. *La ingeniería en los procesos de desertificación*. Ed. Mundi-Prensa, Tragsa. Madrid.
- Madoz, P. (1850): Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar. Tomo XV. [s.e.] Madrid. <http://bibliotecadigital.jcyl.es/i18n/consulta/registro.cmd?id=5719>. Fecha de consulta: 08.03.2012.
- Maestre, F.T.; Cortina, J.; Gil, F.; 2004. Repoblaciones de *Pinus halepensis* y restauración de ecosistemas en medio semiárido. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 17: 181-186.
- MAGRAMA; 2013. Restauración hidrológico-forestal. <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-y-restauracion-forestal/>. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Fecha de consulta: 26 de diciembre de 2013.
- MAGRAMA; 2014. *Sistema de información de datos agrarios (SIGA)*. <http://sig.magrama.es/siga>. Fecha de consulta: 8 de mayo de 2014.
- Marañés, A.; Sánchez, J. A.; De Haro, S.; Sánchez, S. T.; Del Moral, F.; 1998. *Análisis de suelos. Metodología e Interpretación*. Serv. Publ. Univ. Almería. Almería.
- Marín, C.; Desir, G.; 2010. Procesos de erosión en una zona de clima semiárido de la depresión del Ebro (Bardenas Reales, NE de España). *Rev. C. & G.*, 24 (3-4): 63-72.
- MARM; 2011a. *Restauración hidrológico-forestal*. www.marm.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/restauracion-hidrologicoforestal/default.aspx. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Marston, R.A.; Dolan, L.S., 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial pattern of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology*, 31: 313-323.
- Martín-Duque, J.F.; 2007. *Erosión hídrica en cárcavas y barrancos de la provincia de Segovia, España*. Geología & Yacimientos minerales. www.aulados.net.
- Martín-Rosales, W.; Pulido-Bosch, A.; Gisbert, J.; Vallejos, A.; 2003. Sediment yield estimations and check dams in a semiarid area (Sierra de Gádor, southern Spain). In: De Boer, D.; Froehlich, W.; Mizuyama, T.; Pietroniro, A. (eds). *Erosion prediction in ungauged basins: integrated methods and techniques. Proceedings of symposium HS01 Sapporo, IAHS Publ*, 279: 51-58.
- Martín-Vide, J.P.; 2002. *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC. Badalona.
- Martínez, R.; Gómez, A.; García, J.M.; 1991. Ajustes fluviales derivados de cambios de usos del suelo en el Pirineo Aragonés. *Cuaternario y Geomorfología*, 5: 91-105.
- Martínez, F.; Martínez, J.J.; Masiá, R.; Cabanes, S.; 1996. La restauración hidrológico-forestal de Sierra Espuña. *Montes*, 43: 9-11.
- Martínez, M., Romero, A.; Alonso, F.; 2001. Respuesta erosiva de cuencas, corregidas mediante diques de retención de sedimentos, ante lluvias de alta intensidad. Cuenca del río Quípar, sureste de España. *Papeles de Geografía*, 34: 191-203.



- Martínez, J.A.; Ramos, M.C.; García, D.; 2009. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedés region (Northeast Spain). *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 1927-1937.
- Martínez de Azagra, A.; 1993. *Revisión e informatización del modelo de García Nájera para estimar la pendiente de compensación y el caudal generador del lecho*. Congreso Forestal Español. Ponencias y comunicaciones. Tomo I. Lourinzán.
- Martínez de Azagra, A.; Fernández de Villara, R.; Seseña, A.; Méndez, C.; Díez, J.M.; Navarro, J.; Varela, J.M.; 2002. Metodología para la inventariación de diques forestales gavionados. Aplicación en la provincia de Palencia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencia Forestal*, 13: 171-181.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; 1992. Reforestación de cuencas en Murcia. En: Aranda, G. (Coord.). *Hidrología Forestal y Protección de Suelos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Martínez-Lloris, M.; 2006. *El comportamiento hidrodinámico de la cuenca del río Quípar (sureste de España). La función de los diques de corrección hidrológica* (Tesis doctoral). Universidad de Murcia. Murcia.
- Martonne, E.; 1926. L'indice d'aridité. *Bull. Ass. Geogr. franc. (París)*, 9: 3-5.
- May, C.; Gresswell, R.; 2003. Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon coast range, USA. *Earth Surface Processes Landforms*, 28: 409-424.
- McManus, J.; Duck, R.; 1985. Sediment yield estimated from reservoir siltation in the Ochil Hills, Scotland. *Earth Surf. Proc. Land*, 10: 193-200.
- McMellin, G.; Walling, D.E.; Nicholls, D.; 2002. *Land use and Fisheries*. Report W2-046/TR1. Bristol (UK): Environment Agency.
- Messines, J.; 1958. La restauración forestal y la defensa de suelos en China. *Unasyva*, 12(3): 102-120.
- Mintegui, J.A.; 1990. *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria, 306 pp.
- Mintegui, J.A.; 1993. *Homenaje al Dr. J.M. García Nájera*. Congreso Forestal Español. Ponencias y comunicaciones. Tomo I. Lourinzán.
- Mintegui, J.A.; 2007. La ordenación agro-hidrológica y la restauración hidrológico-forestal. Lección Inaugural del Curso Académico 2007-2008. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Mintegui, J. A.; López, F.; 1990. *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Departamento de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco. Vitoria.
- Mintegui, J.A.; Robredo, J.C.; 1994. Caracterización de las cuencas hidrográficas objeto de restauración hidrológico forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del agua*, 1 (2): 69-82.



- Molina, A.; Govers, G.; Van den Putte, A.; Poesen, J.; Vanacker, V.; 2009. Assessing the reduction of the hydrological connectivity of gully systems through vegetation restoration: field experiments and numerical modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 1823-1836.
- Mongil, J.; 2011. *Geología y climatología*. Servicio de publicaciones UCAV. Ávila.
- Mongil, J.; 2014a. *Diques de madera en la República Checa*. <http://ghidrologia.blogspot.com>. Fecha de consulta: 8 de mayo de 2014.
- Mongil, J.; 2014b. *Velocidad de infiltración media en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila)*. Comunicación personal.
- Mongil, J.; Navarro, J.; Cruz, V.; Díaz, V.; 2013. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 38: 107-113.
- Moore, I. D.; G. J. Burch; D. H. Mackenzie; 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Trans. ASAE*, 31:1098-1107.
- Morgan, R.P.C.; 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Moring, J.R.; 1982. Decrease in stream gravel permeability after clear-cut logging: An indication of intergravel conditions for developing salmonid eggs and alevin. *Hydrobiologia*, 88: 295-298.
- Mussetter, R.A.; 1982. *Equilibrium slopes above channel control structures*. Colorado State University, Civil Engineering Department, M.S. thesis, For Collins, CO.
- Nadal-Romero, E.; Martínez-Murillo, J.F.; Vanmaercke, M.; Poesen, J.; 2011. Scaledependency of sediment yield from badland areas in Mediterranean environments. *Progress in Physical Geography*, 35 (3): 297–332. DOI:10.1177/0309133311400330
- Navarro, J.; 2014a. Pérdida de señal de los instrumentos GPS bajo cobertura vegetal. Comunicación personal.
- Navarro, J.; 2014b. Existencia de diques con la cuña de sedimentos cultivadas por cereal en la Sierra de Alcaráz (Albacete). Comunicación personal.
- Navarro, J.; Serrano, C.; Ugalde M.; Oria de Rueda, J.A.; Jonte, M.A.; 1997. Utilización de geotextiles en la corrección de cárcavas del Cristo del Otero (Palencia). *I Congreso Forestal Hispano-Luso*. Pamplona.
- Navarro, J.; De Araújo, J.C.; Mongil, J.; 2014. Assessment of 80 years of ancient-badland forest and hydrologic restoration in Saldaña (Palencia), Spain. *Earth surface processes and landforms*. DOI: 10.1002/esp.3541
- Neil, D.; Mazari, R.; 1993. Sediment yield mapping using small dam sedimentation surveys, Southern Tablelands, New South Wales. *Catena*, 20: 13-25.
- Núñez, J.; 2001. *Manejo y conservación de suelos*. EUNED. San José (Costa Rica).
- Nuttall, P.M.; 1972. The effects of sand deposition upon the macroinvertebrate fauna of the River Camel. Cornwall. *Freshwater Biology*, 2: 181-186.
- Olsson, T.I.; Pettersen, B.; 1986. Effects of gravel size and peat material on embryo survival and alevin emergence of brown trout, *Salmo Trutta* L. *Hydrobiologia*, 1359-14.



- Owens, P.N.; Walling, D.E.; Leeks, G.L.J.; 2000. Tracing fluvial suspended sediment sources in the catchment of the River Tweed, Scotland, using composite fingerprints and a numerical mixing model. En: Foster, ID.L. (Ed). *Tracers in Geomorphology*. Wiley, Chichester: 291-308.
- PAND, 2008. Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- PAP/RAC; 1997. *Guidelines for mapping and measurement of rainfall-induced erosion processes in the Mediterranean coastal areas*. PAP-8/PP/GL.1. Priority Actions Programme Regional Activity Centre (MAP/UNAP), with the cooperation of FAO. Split.
- Patterson, S.S.; 1956: *The forest area of the world and its potential productivity*. Royal University Goteborg.
- Pérez-Soba, I.; 2002. Consideraciones sobre el cálculo por comparación de la pendiente de compensación en la corrección hidrológico-forestal. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 13: 153-158.
- Pérez-Soba, I.; 2009. Diferencias hidrológicas entre ramblas y torrentes-ramblas. *Actas 5º Congreso Forestal Español*.
- Petts, G.E.; 1984. *Impounded rivers: Perspectives for ecological management*. John Wiley. Chichester, 326 pp.
- Pizarro, R.; 2003. *Manual de Conservación de Aguas y suelo. Instructivo No.4 Diques para retención de sedimentos*. Sociedad EIAS LTDA. México. 2003.9 pp.
- Poesen, J.; 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. En: *Farm Land Erosión in Temperate Plains Environment and Hills*. S. Wicherek (Ed.). Elsevier, Amsterdam: 221-239.
- Poesen, J.; Govers, G.; 1990. Gully Erosión in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures. En: *Soil Erosión on Agricultural Land*. J. Boardman, I. D. L. Foster y J. A. Dearing (eds.). John Wiley & Sons, Londres: 513-530.
- Poesen, J.; Hooke, J.M.; 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of outhern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21, 2: 157-199.
- Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Nachtergaele, J.; Oostwoud, D.; Verstraeten, G.; Van Wesemael, B.; 2002. Gully erosion in dryland environments. En: Bull, L.J.; Kirkby, M.J. (Eds), *Dryland Rivers: Hidrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Wiley, Chichester, UK: 229-262.
- Porta, J.; López, M.; Roquero, C.; 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Porto, P.; Gessler, J.; 1999. Ultimate bed slope in calabrian streams upstream of check dams: field study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1231-1242.
- Prosser, I.; Karssies, L.; 2001. *Designing filter strips to trap sediment and attached nutrient*. River and riparian land management technical guideline Nº 1, Land & Water Australia, Camberra.



- Pulido, A.; Simón, E.; Martín, W.; Vallejos, A; Padilla, A.; Navarrete, F.; Pérez, J.; 1992. Efectos sobre el medio ambiente de los diques de retención en la vertiente sur de Sierra de Gador (Almería). *V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio: Problemática Ambiental y Desarrollo*. I. Murcia: 119-128.
- Quintana, F., Barbeito, O.L.; 2004. *Base geológica-geomorfológica para la planificación territorial de la ciudad de Córdoba y su área de influencia*. Universidad Nacional de Córdoba y CONICET. <http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/geoapl/fotogeol/arguello.html>
- Ramos, I.; Navarro, J.; Bartolomé, D.; Díaz, V.; Mongil, J.; 2013. Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). En: G. Montero González, M. Guijarro Guzmán et al. (eds.). *Actas 6º Congreso Forestal Español* CD-Rom. 6CFE01-269. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.
- Ramos, I; 2014. *Eficacia de los diques forestales en el control erosivo en cárcavas corregidas durante las restauraciones del siglo XX en los términos municipales de Saldaña y Lobera de la Vega (Palencia)*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Regüés, D.; 1995: *Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimento en un área acaravada*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 302 pp.
- Regüés, D.; Guàrdia, R.; Gallart, F.; 2000. Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. *Catena*, 40: 173-187.
- Reid, S.M.; Anderson, P.G.; 1999. Effects of sediment released during opencut pipeline water crossings. *Canadian Water Resources Journal*, 24(3): 235-261.
- Reiser, D.W.; White, R.G.; 1990. Effects of streamflow reduction on Chinook salmon egg incubation and fry quality. *Rivers*, 1: 110-118.
- Remaitre, A.; Malet, J.P.; 2010. The effectiveness of torrent check dams to control channel instability: example of debris-flow events in Caly Chales. En: García, C.C. & Lenzi, M.A. (Eds): *Check Dams, Morphological Adjustments*.
- Rey, F.; 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena*, 50: 549-562. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00121-2
- Rice, R.M.; Tilley, F.B.; Datzman, P.a.; 1979. *A watershed's response to logging and roads: South Fork of Caspar Creek, California, 1967-1976 Research Paper PSW-146*, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, Berkeley, California, USA.
- Richards, C.; Bacon, K.L.; 1994. Influence of fine sediment on macroinvertebrate colonization of surface and hyporheic stream substrates. *Great Basin Naturalist*, 54: 106-113.
- Rivas-Martínez, S.; 1987. *Mapa de Series de Vegetación*. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.
- Rivas-Martínez, S.; 2004: 2. Clasificación bioclimática de la Tierra. http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm. Fecha de consulta: 01.04.2012.



- Rivera, J.H.; 1998. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. *Cenicafé. Avances técnicos*: 1-8.
- Rivera, J.H.; Sinisterra, J.A.; Calle, Z.; 2007. *Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia*. Fundación CIVAP.
- Rodríguez-Graells, C.; 2011. Planes de Conservación de Suelos en la provincia de Albacete. Repoblación y Restauración Hidrológico-Forestal. *Foresta*, 47-48: 130-139.
- Rohel, J. W.; 1962. Sediment source areas, delivery ratios, and influencing morphological factors, in Symposium of Bari (Italy). *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 59: 202-213, Bari (Italy).
- Rojo, L.; 1990. La restauración hidrológico-forestal y el control de la erosión: contribución de la ingeniería a la mejora del medio ambiente y a la creación de empleo. *Medio ambiente, ingeniería y empleo : ponencias del 16º Seminario Internacional de la Federación Europea de Asociaciones de Ingenieros*. Madrid. ISBN 84-7433-693-7: 377-391.
- Rojo, L.; Martínez, A.; Torre, S.; García, M.; 2009. Inventario y Difusión de Tecnologías disponibles en España para la Lucha contra la Desertificación. *Actas 5º Congreso Forestal Español*.
- Romero, A.; 2008. Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de investigación geográfica*, 34: 83-99.
- Romero, A.; Martínez, M.; Belmonte, F.; Hernández, E.; 2003. La Cuenca del Río Quipar (región de Murcia): Una cuenca modelo para el estudio de utilidad de los diques de retención de sedimentos en el control de la erosión y en la recarga de acuíferos. *Nimbus*, 11-12: 89-105.
- Romero, A.; Alonso, F.; Martínez, M.; 2007a. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena*, 71: 172-178.
- Romero, A.; Martínez, M.; Alonso, F.; Belmonte, F.; 2007b. The importance of the presence of gullies in the production of sediments in semiarid areas (Murcia, South.east of Spain). En: Casali, J.; Giménez, R. (Eds): *Progress in Gully Erosion Research*. Universidad Pública de Navarra.
- Romero, A.; Marín, P.; Ortiz, R.; 2012. Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena*, 99: 42-53.
- Romiti, G. A.; 1957. *Sistemazione dei bacini montani*. UTET, Torino, 193 pp.
- Rosenzweig, M.L.; 1968. Net primary productivity of terrestrial communities: prediction from climatological data. *The American Society of Naturalists*, 102: 67-74.
- Roshani, R.; 2003. *Evaluating the effect of check dams on flood peaks to optimize the flood control measures (Kan case study in Iran)*. Thesis. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Netherlands: 33-41.
- Rubio, J.L.; 2005. Desertificación. *Ambienta*, 47: 26-31.
- Ryan, P.A.; 1991. Environmental effects of sediment on New Zealand streams: A review. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 25: 207-221.



- Schaffernak, F.; 1922. *Neue Grundlagen für die Berechnung der Geschiebeführung in Flussläufen*. Leipzig y Viena.
- Schälchli, U.; 1992. The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. *Hydrobiologia*, 235/236: 189-197.
- Sendra, P.J.; 2002. *Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales: Aplicación al caso del Arroyo del Partido. Huelva*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Forestal Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid. 400 pp.
- Sharma, P.M.; 1993. *Prevención y control de cárcavas a nivel de finca por medio de métodos vegetativos y estructurales temporales en Honduras tropical*. Proyecto RENARM/ Manejo de cuencas. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Shit, P.K.; Bhunia, G.S.; Maiti, R.; 2013. Assessing the performance of check dams to control rill-gully erosion: Small catchment scale study. *International Journal of Current Research*, 5 (4): 899-906.
- Simon, A.; Darby, S.; 1999. The nature and significance of incised river channels. En: Darby, S.E.; Simon, A. (Eds.); 1999. *Incised rivers*. Jhon Wiley and Sons Press. Chichester (United Kingdom).
- Sobrino, M.A.; Caba, J.; 2012. Análisis comparativo a nivel técnico y económico de distintas tipologías de solución para la corrección hidrológica en las cabeceras de las cuencas de alta montaña en la Comarca del Berguedá. (Barcelona). *VI Congreso Iberoamericano de control de la erosión y los sedimentos*, Granada.
- Soil Survey Division Staff (SSDS); 1993. *Soil survey manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook, 18.
- Soil Survey Division Staff (SSDS); 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Solaimani, K.; Omidvar, E.; Kelarestaghi, A.; 2008. Investigation of Check Dam's Effects on Channel Morphology (Case Study: Chehel Cheshme Watershed. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11 (17): 2083-2091.
- Solé- Benet, A.; Cantón, Y.; Lázaro, R.; Puigdefábregas, J.; 2009. Meteorización y erosión en el Sub-Desierto de Tabernas, Almería. *Cuadernos de investigación geográfica*, 35 (1): 141-163.
- Soto, M.; 2008. Lucha contra la erosión en La Rioja Baja. *Páginas de Información Ambiental*, Nº 27: 24-27.
- Sougnez, N.; Van Wesemael, B.; Vanacker, V.; 2011. Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *Catena*, 84: 1-11.
- Stamey, W.L. y Smith, R.M.; 1965. A conservation definition of erosion tolerance. *Soil Science*, 93 (3): 183-196. http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1964/03000/A_Conservation_Definition_ofErosion_Tolerance.6.aspx. Fecha de consulta: 25 de junio de 2014.
- Stocking, M.; Murnaham, N.; 2003. *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*. Ediciones Mundi-Prensa. Murcia.



- Takahashi, T.; 1991. *Debris Flow*. International Association for Hydraulic Research, Rotterdam. 165 pp.
- Thorntwaite, C. W.; Matter, J.R.; 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. *Climatology*, 10(3):185-311.
- Tian, P.; Zhao, G.; Mu, X.; Wang, F.; Gao, P.; Mi, Z.; 2013. Check dam identification using multisource data and their effects on streamflow and sediment load in a Chinese Loess Plateau catchment. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7: 073697:1-13.
- Tilman, K.; 2000. Pleistocene paleo-environmental changes in the high mountain ranges of Central China and adjacent regions. *Quat. Int.*, 65-66: 147-160.
- Toniutti, N.; 2004. *Preliminary study for the identification of a valid alternatives to the water retention basins to be carried out in the middle reaches of the Tagliamento River*. Vol. II - supplement, World Wide Fund for Nature, 43p.
- Torri, D.; Calzolari, C.; Rodolfi, G.; 2000. Badlands in changing environments: an introduction. Preface. *Catena*, 40 (2): 119-125.
- Torri, D.; Santi, E.; Marignani, M.; Rossi, M.; Borselli, L.; Maccherini, S.; 2013. The recurring cycles of biancana badlands: erosion, vegetation and human impact. *Catena*, 106: 22-30.
- UE; 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. BOE de 22 de diciembre de 2000.
- UNEP; 1997. *World Atlas of Desertification*. 2nd. ed. United Nations Environment Programme: London.
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers); 1989. *Engineering and design: Sedimentation investigations of rivers and reservoirs*. Engineering Manual 1110-2-4000, Washington, D.C.
- USDA; 1985. *Keys to soil taxonomy*. SMSS Technical monograph, 6. 244 pp
- USDA; 2014a. *National Soil Survey Handbook 430-VI*. <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>. Fecha de consulta: 1 de julio de 2014.
- USDA; 2014b. *Soil Textural Triangle*. http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/kthru6/?cid=nrcs142p2_054311. Fecha de consulta: 5 de mayo de 2014.
- Valentin, C.; Poesen, J.; Li, Y.; 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63 (2-3): 132-153.
- Vallauri, D.R.; Aronson, J.; Barbero, M.; 2002. An analysis of forest restoration 120 years after reforestation on badlands in the Southwestern Alps. *Restoration Ecology*, 10(1):16-26.
- Van den Wall Bake, G.W.; 2002. Siltation and soil erosion survey in Zimbabwe, En: *Drainage basin sediment delivery. Proceedings of the Albuquerque symposium*, August 1986. Hadley, R. (Ed.), IAHS Publication. 159, 69-80, 1986.
- Van Nieuwenhuysse, E.E.; LaPerriere; J.D.; 1986. Effects of placer gold mining on primary production subarctic streams of Alaska. *Water Resources Bulletin*, 22: 91-99.



- Varela, J.M. (Dir); 1999. *Inventario de obras de corrección hidrológica-forestal de las variables ambientales relacionadas con las mismas*. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Dirección General de Obras Hidráulicas.
- Vargas, I.; 2006. Obras de control y regulación hidráulica para la protección y disminución de la erosión y arrastre de sedimentos. *III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos*. Buenos Aires, Argentina.
- Verheijen, F.G.A.; Jones, R.J.A.; Rickson, R.J.; Smith, C.J.; 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Sci Rev*, 94: 23-38.
- Vericat, D.; Batalla, R.J; 2004. Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Rev. C. & G.*, 18 (1-2): 37-50.
- Vernet, J.L.; 1966: Sur un indice bioclimatique applicable aux climates de la France. *Naturalia Monspelienis. Serie Botanique*, 17. Montpellier.
- Verstraeten, G.; Poesen, J.; 2000. Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Prog Phys Geog*, 24(2): 219-251.
- Verstraeten, G.; Poesen, J.; 2001. Modelling the long-term sediment trap efficiency of small ponds. *Hydrol Process*, 15: 2797-2819.
- Verstraeten, G.; Poesen, J.; De Vente, J.; Koninckx, X.; 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*, 50: 327-348.
- Walter, H.; Lieth, H.; 1967. *Klimadiagramm-Weltatlas*. VEB Gustav Fischer. Jena.
- Wang, Y.; Chen, L.; Fu, B.; Lü, Y.; 2014. Check dam sediments: an important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China. *Environ Monit Assess*.
- Waters, T.F. 1995. *Sediment in streams: sources, biological, effects and control*. American fisheries Society Monograph 7. AFS, Bethesda, Maryland, 251 pp.
- White, P.; Labadz, J.; Butcher, D.; 1996. Sediment yield estimates from reservoir studies: an appraisal of variability in the southern Pennines of the UK. In: Walling, D. & Webb, B.; 1996 (Eds): *Erosion and sediment yield: global and regional perspectives (proceedings of the Exeter symposium, July 1996)*. IAHS Publication 236, Wallingford: IAHS Press, 163-174.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D.; 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook, 537 pp.
- Wohl E.; 2006. Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79: 217-248.
- Wood, P.J.; Armitage, P.D.; 1997. Biological effects of fine sediments in the lotic environment. *Environmental Management*, 21: 203-217.
- Wright, J.F.; Berrie, A.D.; 1987. Ecological effects of groundwater pumping and a natural drought on the upper reaches of a chalk stream. *Regulated Rivers Research and Management*, 1: 145-160.
- Xu, M.; Wang, G.; 2000. To accelerate the construction of check-dams in the Loess Plateau. *Yellow River*, 22: 26.



- Xu, X. Z.; Zhang, H.W. Feng, S.X.; Dong, Z.; Gan, Z.; 2002. *Check-Dam system in gullies the most effective measure to conserve soil and water in Chinese Loess Plateau*. 12th ISCO Conference Beijing.
- Xu, X. Z.; Zhang, H.W.; Zhang, O.Y.; 2004: Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China. *Environmental Science & Policy*, 7: 79-86.
- Xu, X. Z.; Zhang, H. W.; Wang, G. Q.; Peng, Y.; Zhang, O. Y.; 2006. A laboratory study on the relative stability of the check dam system in the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 17: 629-644. doi:10.1002/ldr.740.
- Yair, A.; Sharon, D.; Lavee, H.; 1980. Trends in runoff and erosion processes over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Hydrological Sciences Journal*, 25: 3, 243-255.
- Yassoglou, N.J.; 1990. *A study of the conditions and prospective for the use of urea as a nitrogen fertilizer in Greek soils*. Report submitted to the Nitrogen fertilizers Company of Greece (Grk). 23 pp.
- Zaimes, G.N.; Schultz, R.C.; Tufekcioglu, M.; 2009. Gully and stream bank erosion in three pastures with different management in southeast Iowa. *Jour. Iowa Acad. Sci.*, 116 (1-4): 1-8.
- Zhang, L.; Shi, C.X.; Zhang, H.; 2010, Effects of check-dams on sediment storage-release in Chabagou watershed. *Transactions of the CSAE (in Chinese with English abstract)*, 26(2): 64-69.
- Zhao, G.; Mu, X.; Wen, Z.; Wang, F. & Gao, P.; 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degrad. Develop.*, 24: 499-510.
- Zeng, Q.L.; Yue, Z.Q.; Yang, Z.F.; Zhang, X.J.; 2009. A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia Stream, China. *Environ Geol*, 58: 897-911.
- Ziemer, R.R.; 1981. The role of vegetation in the stability of rooted slopes. En: *Proceedings of the International Union of Forestry Research, XVII World Congress, Kyoto, Japan*. Vol. I: 297-308.

ANEXOS

ANEXO I:

**Inventario de los diques de la
restauración hidrológico-forestal de
Tórtoles**



A1.1. METODOLOGÍA

La inventariación de los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila) se ha realizado gracias al proyecto de investigación “Inventariación de diques forestales y evaluación de la restauración, financiado por el convenio Universidad Católica de Ávila-Caja de Ávila, en el que también se incluye la presente tesis doctoral. Esta metodología se basa en la diseñada por Martínez de Azagra *et al.* (2002), para inventariar los diques de la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia).

La localización de los diques se realizó recopilando, en primer lugar, la cartografía existente sobre la zona: las hojas 1:25.000 del IGN, las ortofotos del PNOA, y el plano topográfico del proyecto, y posteriormente con su reconocimiento en campo, comprobando la falta de correspondencia entre los diques proyectados y los diques finalmente ejecutados. Para facilitar la inventariación se dividió la zona en 4 sectores aparentemente homogéneos. Con esta sectorización se realizó el inventario de cada dique, de oeste a este y de aguas abajo a aguas arriba, es decir desde la desembocadura de las cárcavas a su cabecera.

- Primer sector: zona de pendientes más suaves y con menor superficie repoblada.
- Segundo sector: correspondiente con los barrancos de la divisoria opuesta al cauce principal.
- Tercer sector: barranco principal y sus tributarios.
- Cuarto sector: pequeñas cárcavas paralelas entre sí, localizadas por encima del pueblo y zona occidental.

Las variables registradas se plasmaron en una ficha de campo (Figura A1.1), basada en la propuesta por Martínez de Azagra *et al.* (2002), y que se divide en cuatro bloques:

- Primer bloque: utilizado para la identificación del dique
- Segundo bloque: contiene datos generales del dique
- Tercero: indica las dimensiones del dique
- Cuarto bloque: incluye otros datos no recogidos en los bloques anteriores.

A continuación se explican las variables de la ficha de campo:

- Código dique: se corresponde con el número de dique (Dique, en tablas). Reasignado en gabinete tras una primera numeración conforme se localizaba el dique en campo.
- Fecha de visita: el inventario se realizó en un total de 7 días, y una media de 11 horas de trabajo por día.
- Inventariador: nombre de la persona que hizo el inventario⁴.

⁴ Los trabajos de campo fueron realizados por Luis Ignacio Resina Gutiérrez y Álvaro Díaz Sánchez bajo la dirección del profesor Jorge Mongil Manso.




Código dique:	Fecha:				
Inventariador:					
DATOS GENERALES					
Situación:	Coordenada X:	Coordenada Y:			
Finalidad de la obra:					
Modelo de dique:	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
Material:	Fecha de construcción:				
Reforestación en la cuenca:	Si <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>			
DIMENSIONES					
Altura útil:	Altura total:				
Longitud en coronación:	a:	b:	c:		
Espesor en coronación:					
Número de hiladas:					
Altura de cada hilada:					
	H1:	H4:	H7:	H10:	
	H2:	H5:	H8:	H11:	
	H3:	H6:	H9:	H12:	
Vertedero:	Sencillo <input type="checkbox"/>	Múltiple <input type="checkbox"/>	nº:	Tipo:	
Obras auxiliares:	Mechinales <input type="checkbox"/>				
	Disipador de energía <input type="checkbox"/>				
	Muros de contención <input type="checkbox"/>				
Estado general de la obra:	Bueno <input type="checkbox"/>	Dañado por:		En ruina <input type="checkbox"/>	
OTROS DATOS					
Altura aterramiento:					
Vegetación en el aterramiento:					
Vegetación en las laderas:					
Importancia actual de la obra:	Baja <input type="checkbox"/>	Moderada <input type="checkbox"/>	Importante <input type="checkbox"/>	Muy importante <input type="checkbox"/>	

Figura A1.1. Ficha de campo para el inventario de diques gavionados (modificado de Martínez de Azagra *et al.*, 2002)



Datos generales:

- Situación: Todos los diques se localizan en el término municipal de Tórtoles. Para cada dique se indican sus coordenadas UTM X e Y, referidas al Sistema Geodésico ETRS89, Huso 30.
- Finalidad de la obra: la finalidad de la totalidad de los diques inventariados es la retención de sedimentos.
- Modelo de dique (Mod en Tablas): En diferencia con la ficha de Martínez de Azagra *et al.* (2002) se establecen 5 modelos de diques (Figura A1.2):
 - Modelo 1: Dique de mampostería gacionada simple, sin vertedero, con gradones que forman un perfil triangular tipo 1.1.
 - Modelo 2: Como el modelo 1 pero con vertedero.
 - Modelo 3: Añade al modelo 2 contrafuertes a ambos lados para dotar de mayor estabilidad a la obra y sujetar con más fuerza los taludes.
 - Modelo 4: Igual al modelo 3, pero además incorpora disipador de energía.
 - Modelo 5: Incluye aquellos escasos diques que presentan tipologías distintas y que son: Diques con recubrimiento de hormigón en el paramento superior, diques de mampostería seca y diques asimétricos.
- Material (Mt en Tablas): Se han encontrado dos diques de mampostería seca, uno recubierto en su paramento superior por hormigón y todos los demás han sido construidos de mampostería gacionada.
- Fecha de construcción: De acuerdo con la documentación de la que se dispone, la totalidad de los diques fueron construidos en 1965.
- Reforestación en la cuenca (Rft en Tablas): En todos los casos la cuenca se encuentra reforestada.

Dimensiones:

- Altura útil (m) (AU en Tablas)
- Altura total (m) (AT en Tablas)
- Longitud total en coronación (m) ($LC=a+b+c$, en Tablas): Siendo “a” la longitud del ala izquierda aguas arriba, “b” el ancho del vertedero cuando exista, y “c” la longitud del ala derecha aguas arriba. En caso de no existir vertedero tan solo se refleja una medida que corresponde al total.
- Espesor en coronación (m): En el vertedero y en las alas (en Tablas ECv y ECa, respectivamente).



Figura A1.2. Ejemplos de los modelos de diques. De izquierda a derecha y de arriba abajo, modelo 1: dique de mampostería gavionada simple sin vertedero; modelo 2: dique de mampostería gavionada simple con vertedero; modelo 3: dique con vertedero y contrafuertes; modelo 4: dique con vertedero, contrafuertes y dissipador de energía; y modelo 5: otras tipologías de diques (6 fotos).



- Número de hiladas (Nºh en Tablas): Sólo aplicable en diques gavionados.
- Altura de cada hilada (m): Expresadas en metros y siempre, de la superior (en diques con vertedero la primera se corresponde con la altura del ala) a la inferior.
- Vertedero (Vtd en Tablas): Indica si dispone de vertedero, si es sencillo o múltiple (indicando el número en este caso) y si éstos son rectangulares, trapezoidales, parabólicos u otros posibles.
- Obras auxiliares:
 - Mechinales: Ninguno de los diques dispone de mechinales.
 - Disipador de energía (DE en Tablas): Se indica si dispone de disipador o no, y en caso afirmativo su anchura (DEa en Tablas) y su longitud (DEl en Tablas), ambas expresadas en m.
 - Muros de contención (MC en Tablas): Si existen o no.
- Estado general de la obra (EO en Tablas): Toma valores de 1 a 7 en función de los siguientes criterios:
 - Dique en buen estado: No presentan ningún tipo de daño, aunque no debe descuidarse su mantenimiento (valor 1)
 - Diques dañados, por:
 - Sifonado. El cauce circula por debajo del dique. (valor 2)
 - Asentamiento. Desestabilización general del dique debido al vencimiento del terreno. (valor 3)
 - Deslizamiento. Entre los gaviones que lo componen o sobre el terreno. (valor 4)
 - Desestribado. (valor 5)
 - Rotura de la malla. (valor 6)
 - Diques en ruina (valor 7)

Otros datos:

- Altura del aterramiento (m) (AA en Tablas)
- Vegetación en el aterramiento (Veg. At. en Tablas): especies asentadas en la cuña de sedimentos
- Vegetación en las laderas adyacentes (Veg. Lad. en Tablas): especies presentes en las laderas
- Importancia actual de la obra (IO en Tablas): Toma un valor de 1 a 4 de acuerdo con los siguientes criterios:



- Importancia baja, 1: Diques que a pesar del paso de los años su cuenca vertiente no genera sedimentos por lo que su desmantelamiento no representaría un problema.
- Importancia moderada, 2: Diques cuya cuenca genera un bajo aporte de sedimentos pero que en cualquier caso la falta de estos diques provocaría una inmediata desestabilización de los taludes del cauce ahora protegidos por la obra, así como la reactivación de los fenómenos erosivos en las cercanías del dique.
- Importante, 3: Diques en los que es visible el aporte de sedimentos tras las lluvias, aunque en poca cantidad. Se trata por tanto de diques importantes en el proceso global de estabilización de la cárcava en que se encuentran.
- Muy importante, 4: Diques que se encuentran cercanos al aterramiento con aporte constante de sedimentos en la actualidad. Este aporte es fácilmente visible tras las lluvias o incluso se comienzan a verter sedimentos por encima de ellos. Por tanto, su labor de estabilización continua siendo hoy día muy importante.

El procedimiento seguido para el inventario de los diques de Tórtoles fue el siguiente:

1. Se accede a la parte superior del dique para obtener una visión general de éste y del estado de la obra y su entorno.
2. Se deposita el GPS sobre la obra para que durante el transcurso del resto de mediciones vaya ganando en precisión, y antes de abandonar el dique se guarda su posición.
3. Se rellena la ficha de campo (Figura A1.1).
4. Para la medición de ciertas variables se procede de la siguiente forma:
 - a. Medición de las anchuras del dique: Para ganar rapidez, se realiza de izquierda a derecha del dique (en sentido aguas arriba) de manera que se fija el extremo de la cinta métrica en el lado izquierdo del dique y se da la total en caso de diques sin vertedero, o al comienzo del vertedero, final del vertedero y final de la obra, si es que se dispone de este elemento. De esta forma, de una sola medición se obtienen por diferencia todas las dimensiones del dique.
 - b. La medición de la altura de los gradones se realiza empezando con el superior y siguiendo con los inferiores, midiendo en primer lugar el más alto independientemente de que se trate de las alas (dique con vertedero) o de un gradón superior (dique sin vertedero).
 - c. La anchura de los gradones se mide según se comienza la subida al dique aguas arriba, para continuar con la progresión por el barranco.
5. Se completan el resto de variables de la ficha y se anota la posición mediante el uso de GPS.

En la Figura A1.3 se puede observar la ubicación de los diques inventariados correspondientes a la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles.



Figura A1.3. Ubicación de los diques inventariados



A1.2. RESULTADOS DEL INVENTARIO

Los resultados del inventario se muestran en las Tablas A1.1 a A1.15, y las imágenes de cada dique inventariado se pueden observar en las Figuras A1.a a A1.15.

Tabla A1.1. Resultados del inventario para los diques 1 a 8

Dique	1	2	3	4	5	6	7	8
UTM X	307925,1	307916,3	307907,0	308004,0	307894,4	307871,9	307812,1	307868,1
UTM Y	4492723,6	4492740,8	4492756,2	4492753,3	4493126,4	4493151,7	4493175,7	4493222,3
Fecha	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	06/07/2010	06/07/2010
Mod	1	5	5	4	2	2	1	2
Material	M. gavionada	Mampostería	Mampostería	M. gav.	M. gav.	M. gav.	M. gav.	M. gav.
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	0,4	0,4	1	1	1	1	1
LC	5,5	6,5	4	19,4	10,1	8,6	5	9,8
a	-	-	-	8,5	4,3	2,6	-	4,8
b	-	-	-	2	1	1,2	-	0,95
c	-	-	-	8,9	4,8	4,8	-	4,05
Vtd	No	No	No	Sencillo	Sencillo	Sencillo	No	Sencillo
DE	No	No	No	Si	No	No	No	No
DEa	0	0	0	4,2				
DEl	0	0	0	2,4				
MC	No	No	No	Si	No	No	No	No
EO	1	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Lavandula stoechas</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Timus</i> sp., <i>Cytisus</i> <i>scoparius</i> , <i>Usnea</i> sp., <i>Ramalina</i> sp., <i>Claudonia</i> sp., <i>Halimium</i> <i>umbellatum</i>	<i>Halimium</i> <i>umbellatum</i>	-	<i>Pinus</i> <i>silvestris</i> , <i>Salix fragilis</i> , <i>Rubus</i> sp., <i>Populus</i> <i>nigra</i>	<i>Pinus nigra</i> , <i>Sambucus</i> <i>nigra</i>	<i>Quercus</i> <i>ilex</i> , <i>Rubus</i> sp., <i>Pinus</i> <i>pinaster</i>	Musgos y hierbas	<i>Quercus ilex</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	3	1	1	1	4	4	2	1
AU	1,1	1,2	1	3,75	2,1	1,6	2,05	2
AT	1,1	1,2	1	4,3	2,65	2,1	2,05	2,55
AA	0,83	0,45	0,91	0,68	2,1	0,99	1,55	1
Nºh	2	-	-	8	5	4	4	5
H1	0,55	-	-	0,55	0,55	0,5	0,5	0,55
H2	0,55	-	-	0,6	0,55	0,55	0,5	0,5
H3	-	-	-	0,6	0,55	0,55	0,55	0,5
H4	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
H5	-	-	-	0,5	0,5	-	-	0,5
H6	-	-	-	0,55	-	-	-	-
H7	-	-	-	0,5	-	-	-	-
H8	-	-	-	0,5	-	-	-	-



Figura A1.4. Fotos de los diques 1 a 8



Tabla A1.2. Resultados del inventario para los diques 9 a 16

Nº	9	10	11	12	13	14	15	16
UTM X	307964,9	307960,1	307965,1	307978,8	307997,1	308019,7	308044,7	308061,7
UTM Y	4493131,6	4493180,5	4493204,0	4493113,0	4493169,6	4492785,1	4492811,0	4492847,0
Fecha	24/10/2010	06/07/2010	06/07/2010	24/10/2010	03/01/2011	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010
Mod	2	2	2	2	2	4	4	4
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
Eca	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	7	6,8	8,6	7,2	6,6	12,5	16,2	12,2
a	3,2	3,8	4,6	2,9	2,8	5,8	5,4	6
b	1	1	1,2	1,5	1,05	2	2,1	1,5
c	2,8	2	2,8	3,7	2,75	4,7	8,7	4,7
Vtd	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	Si	Si	Si
DEa	-	-	-	-	-	2	3,85	1,5
DEl	-	-	-	-	-	3	3	2,9
MC	No	No	No	No	No	Si	Si	Si
EO	1	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Cytisus scoparius</i> , <i>Pinus nigra</i>	<i>Salix atrocinerea</i> , <i>Cytisus laurifolius</i> , <i>Lavandula stoechas</i> , <i>C. scoparius</i>	<i>Lavandula stoechas</i> , <i>Cytisus laurifolius</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Rubus</i> <i>sp.</i> , <i>Salix atrocinerea</i> , <i>Populus nigra</i> , <i>Cistus laurifolius</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Cytisus scoparius</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Prunus avium</i> . <i>Rubus sp.</i> , <i>Daphne gnidium</i> . <i>Salix atrocinerea</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Salix atrocinerea</i> , <i>Quercus ilex</i>	<i>Rubus, silvestre</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>Quercus ilex</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	2	1	2	2	2	2	1	2
AU	1,5	1,1	2,7	2,2	1,65	3,75	3,85	3,75
AT	2,05	1,65	3,25	2,75	2,2	4,35	4,4	4,3
AA	1,25	0,55	0,84	1,24	1,09	2	2,51	2,51
Nºh	4	3	6	5	4	8	8	8
H1	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,6	0,55	0,55
H2	0,5	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5	0,55	0,55
H3	0,5	0,55	0,55	0,55	0,55	0,6	0,55	0,5
H4	0,5	-	0,5	0,55	0,55	0,6	0,55	0,55
H5	-	-	0,55	0,55	-	0,55	0,55	0,55
H6	-	-	0,55	-	-	0,5	0,55	0,55
H7	-	-	-	-	-	0,5	0,55	0,55
H8	-	-	-	-	-	0,5	0,55	0,5



Figura A1.5. Fotos de los diques 9 a 16



Tabla A1.3. Resultados del inventario para los diques 17 a 24

Nº	17	18	19	20	21	22	23	24
UTM X	308066,3	308077,1	308075,5	308086,6	308095,7	308095,7	308082,6	308066,9
UTM Y	4492887,2	4492921,7	4492949,2	4492970,6	4492993,7	4493012,0	4493034,5	4493039,5
Fecha	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010	24/10/2010
Mod	4	4	2	2	2	2	2	1
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
Eca	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	10,8	9,3	10,5	11,15	10,7	8	6,5	3,8
a	4,1	3,7	5	5,15	4,8	4	2,7	-
b	1,9	1,3	0,9	1	1	1	1	-
c	4,8	4,3	4,6	5	4,9	3	2,8	-
Vtd	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	No
DE	Si	Si	No	No	No	No	No	No
DEa	2	2,3	-	-	-	-	-	-
DEl	2,4	3,2	-	-	-	-	-	-
MC	Si	Si	No	No	No	No	No	No
EO	6	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Quercus ilex</i> , <i>Cytisus scoparius</i>	<i>Sambucus nigra</i> , <i>Salix atrocinerea</i> , <i>S. caprea</i> , <i>Rosa</i> sp., <i>Rubus</i> sp., <i>Pinus sylvestris</i>	<i>Salix caprea</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Rubus</i> sp.	<i>Rosa</i> sp., <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus pinaster</i> , <i>Timus</i> sp.	<i>Cistus laurifolius</i>	<i>Cistus laurifolius</i>	-	-
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	3	2	3	1	2	2	1	1
AU	4,4	3,3	3,3	1,55	1,6	1,65	1,1	1,1
AT	4,95	3,85	3,85	2,1	2,1	2,2	1,65	1,1
AA	3,53	1,9	1,71	1,33	0,58	0,76	0,55	1
Nºh	9	7	7	4	4	4	3	2
H1	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5	0,55	0,55	0,6
H2	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5
H3	0,6	0,6	0,55	0,5	0,55	0,55	0,55	0
H4	0,5	0,55	0,55	0,5	0,5	0,55	-	-
H5	0,55	0,55	0,55	-	-	-	-	-
H6	0,55	0,55	0,55	-	-	-	-	-
H7	0,55	0,5	0,55	-	-	-	-	-
H8	0,55	-	-	-	-	-	-	-
H9	0,55	-	-	-	-	-	-	-



Figura A1.6. Fotos diques 17 a 24



Tabla A1.4. Resultados del inventario para los diques 25 a 32

Nº	25	26	27	28	29	30	31	32
UTM X	308157,9	308360,0	308267,3	308231,7	308218,7	308192,0	308364,9	308369,0
UTM Y	4492521,7	4492653,8	4492738,1	4492751,4	4492780,3	4492792,2	4492727,9	4492794,0
Fecha	12/10/2010	03/01/2011	12/10/2010	12/10/2010	12/10/2010	03/01/2011	03/01/2011	05/07/2010
Mod	4	2	3	2	4	2	2	4
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	25	17,5	20,5	6,3	9,9	11,7	16,1	23,95
a	10,8	7,4	9	2,65	5	4,7	7,5	10,7
b	2	1,9	2	1,13	0,9	1,1	2	1,75
c	12,2	8,2	9,5	2,52	4	5,9	6,4	11,5
Vtd	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Elevado	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo
DE	No	No	No	No	Si	No	No	No
DEa	-	-	-	-	1,9	-	-	-
DEl	-	-	-	-	2,2	-	-	-
MC	No	No	Si	No	Si	No	No	1
EO	1	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Pinus nigra</i> , <i>Populus nigra</i>	-	<i>Quercus ilex</i> , <i>Sambucus nigra</i> , <i>Digitalis purpurea</i> , <i>Rubus sp.</i>	<i>Cupressus arizonica</i> , <i>Thymus sp.</i>	<i>Thymus sp.</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Cytisus scoparius</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Salix sp.</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Populus nigra</i>	<i>Juncus sp.</i> , <i>Ranunculus sp.</i> , <i>Phlomis sp.</i> , <i>Rubus sp.</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	4	3	4	3	4	4	3	4
AU	3,05	4,2	4,15	1,73	2,2	2,2	4,5	2,2
AT	3,55	4,8	4,71	2,03	2,8	2,8	5,1	2,75
AA	3,05	2,05	4,15	1,73	2,2	2,2	2,5	2,2
Nºh	7	9	9	4	5	5	10	5
H1	0,5	0,6	0,56	0,53	0,6	0,6	0,6	0,55
H2	0,5	0,55	0,5	0,5	0,55	0,5	0,5	0,55
H3	0,5	0,5	0,5	0,45	0,55	0,55	0,5	0,55
H4	0,5	0,55	0,5	0,55	0,55	0,55	0,5	0,55
H5	0,55	0,55	0,5	-	0,55	0,55	0,5	0,55
H6	0,5	0,55	0,55	-	-	-	0,5	-
H7	0,5	0,5	0,55	-	-	-	0,5	-
H8	-	0,5	0,55	-	-	-	0,5	-
H9	-	0,5	0,5	-	-	-	0,5	-
H10	-	-	-	-	-	-	0,5	-



Figura A1.7. Fotos diques 25 a 32



Tabla A1.5. Resultados del inventario para los diques 33 a 40

Nº	33	34	35	36	37	38	39	40
UTM X	308312,9	308286,8	308265,9	308247,4	308234,8	308220,5	308493,4	308525,9
UTM Y	4492820,9	4492827,5	4492834,3	4492843,3	4492843,1	4492845,6	4492861,7	4492864,2
Fecha	12/10/2010	12/10/2010	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	05/07/2010	12/10/2010
Mod	4	2	2	4	2	1	2	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	14,2	8,8	9,7	18	6,8	3,9	11,7	15,5
a	6,7	3,8	3,55	8,5	2,8	-	4,9	7,8
b	1,9	1	1	1	1,1	-	1,1	1
c	5,6	4	5,15	8,5	2,9	-	5,7	6,7
Vtd	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	No	Sencillo	Sencillo
DE	Si	No	Si	No	No	No	No	No
DEa	3,9	-	-	2,7	-	-	-	-
DEI	3	-	-	2	-	-	-	-
MC	Si	No	Si	No	No	No	No	No
EO	6	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Quercus ilex</i>	-	<i>Pinus pinaster, Cupressus arizonica, P. halepensis</i>	<i>Quercus ilex, Rosmarinus officinalis, Hedera helix</i>	-	<i>Pinus pinaster, P. halepensis</i>	-	<i>Sambucus nigra, Quercus ilex</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	4	4	4	4	3	4	2	2
AU	3,7	2,13	2,1	3,33	1,65	1	2,1	2,75
AT	4,2	2,68	2,7	3,99	2,25	1	2,65	3,3
AA	3,3	2,13	2,1	3,3	1,4	1	1	2,2
Nºh	8	5	5	7	4	2	5	6
H1	0,5	0,55	0,6	0,6	0,6	0,5	0,55	0,55
H2	0,55	0,53	0,55	0,57	0,55	0,5	0,55	0,55
H3	0,5	0,55	0,55	0,5	0,55	-	0,5	0,55
H4	0,55	0,55	0,5	0,57	0,55	-	0,55	0,55
H5	0,5	0,5	0,5	0,55	-	-	0,5	0,55
H6	0,55	-	-	0,6	-	-	-	0,55
H7	0,55	-	-	0,6	-	-	-	-
H8	0,5	-	-	-	-	-	-	-



Figura A1.8. Fotos diques 33 a 40



Tabla A1.6. Resultados del inventario para los diques 41 a 48

Nº	41	42	43	44	45	46	47	48
UTM X	308525,8	308486,4	308292,8	308267,8	308226,5	308196,9	308206,7	308251,0
UTM Y	4492888,8	4492909,7	4492911,0	4492915,9	4492914,3	4492912,5	4492928,9	4492956,4
Fecha	05/07/2010	05/07/2010	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	06/07/2010
Mod	2	1	5	2	4	2	2	4
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	18,55	10	7	11	17,5	15,7	15,6	18,8
a	9,65	-	-	5,2	7,8	5,85	6,7	6,9
b	1	-	-	1,05	1	1,9	2,1	2
c	7,9	-	-	4,75	7,7	7,95	6,8	9,9
Vtd	Sencillo	No	No	Elevado	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Si
DE	No	No	Si	No	Si	No	No	Si
DEa	-	-	2,5	-	3,9	-	-	3,5
DEI	-	-	2,85	-	3,6	-	-	5,5
MC	No	No	Si	No	Si	No	No	No
EO	1	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Quercus ilex</i>	-	<i>Pinus pinaster, P. halepensis</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Pinus halepensis, Cistus laurifolius, Quercus ilex</i>	<i>Pinus halepensis, Cytisus scoparius</i>	<i>Pinus halepensis, Cistus ladanifer</i>	<i>Cytisus scoparius, Rubus sp.</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	3	3	2	4	3	4	4	2
AU	2,25	1,8	1,5	2,02	4,55	2,15	3,28	3,9
AT	2,75	1,8	1,5	2,62	5,15	2,75	3,82	4,45
AA	1,85	1,2	1	1,52	4	2	3,21	2,2
Nºh	5	3	3	4	9	5	7	8
H1	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,55	0,55
H2	0,6	0,6	0,5	0,57	0,55	0,55	0,55	0,55
H3	0,55	0,6	0,5	0,6	0,6	0,55	0,5	0,6
H4	0,55	-	-	0,55	0,55	0,5	0,57	0,55
H5	0,55	-	-	-	0,55	0,55	0,55	0,6
H6	-	-	-	-	0,55	-	0,55	0,55
H7	-	-	-	-	0,55	-	0,55	0,55
H8	-	-	-	-	0,6	-	-	0,5
H9	-	-	-	-	0,6	-	-	-



Figura A1.9. Fotos diques 41 a 48



Tabla A1.7. Resultados del inventario para los diques 49 a 56

Nº	49	50	51	52	53	54	55	56
UTM X	308225,7	308200,1	308205,8	308180,3	308379,3	308293,3	308261,8	308190,4
UTM Y	4492971,4	4492973,3	4492982,2	4493000,8	4492964,3	4493022,1	4493039,2	4493019,3
Fecha	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	05/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010
Mod	4	2	2	5	2	1	2	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	19	12,1	12,7	16,8	6	7,40	10,8	9
a	8,5	5,2	6,7	-	2	-	3,8	4
b	2	1,25	1,15	-	1	-	1,1	1
c	8,5	5,65	4,85	-	3	-	5,9	4
Vtd	Si	Si	Si	Si	Sencillo	No	Elevado	Si
DE	No	No	No	No	No	No	No	No
DEa	4,05	-	-	-	-	-	-	-
DEl	2	-	-	-	-	-	-	-
MC	No	No	No	No	No	No	No	No
EO	1	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	-	-	<i>Pinus sp.</i>	-	<i>Rubus sp., Rosa sp., Salix alba, Lonicera sp.</i>	<i>Rosa sp.</i>	<i>Rosa sp.</i>	-
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	3	4	4	4	2	1	4	4
AU	3,85	1,5	1,1	1,65	1,31	2	2,05	1
AT	4,4	2,1	1,65	2,2	1,54	2	2,3	1,5
AA	3,35	1,5	1,1	1,65	0,3	1	2,05	-
Nºh	8	4	3	4	3	2	3	3
H1	0,55	0,6	0,55	0,55	0,55	1	0,55	0,5
H2	0,5	0,5	0,5	0,55	0,75	1	0,95	0,5
H3	0,55	0,5	0,6	0,55	0,24	-	0,8	0,5
H4	0,6	0,5	-	0,55	-	-	-	-
H5	0,55	-	-	-	-	-	-	-
H6	0,55	-	-	-	-	-	-	-
H7	0,5	-	-	-	-	-	-	-
H8	0,6	-	-	-	-	-	-	-



Figura A1.10. Fotos diques 49 a 56



Tabla A1.8. Resultados del inventario para los diques 57 a 64

Nº	57	58	59	60	61	62	63	64
UTM X	308230,1	308218,4	308199,8	308183,0	308149,7	308114,4	308073,6	308047,5
UTM Y	4493039,8	4493059,6	4493065,8	4493077,8	4493080,4	4493072,3	4493079,2	4493122,5
Fecha	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	03/01/2011
Mod	2	1	2	2	2	4	4	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	13,1	10	5,1	10,6	8,4	17,5	10	7,9
a	4,5	-	1,9	4,65	4,2	7	4,3	3,9
b	1,1	-	1,1	1,05	1	1,75	1,1	1,1
c	7,5	-	2,1	4,9	3,2	8,75	4,6	2,9
Vtd	Si	No	Elevado	Elevado	Elevado	Si	Si	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	si	Si	No
DEa	-	-	-	-	-	4	-	-
DEl	-	-	-	-	-	4,6	-	-
MC	No	No	No	No	No	Si	Si	No
EO	1	1	1	4	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Salix atrocinerea</i> , <i>Rosa sp.</i>	<i>Salix alba</i> , <i>Rosa sp.</i>	<i>Cytisus ladanifer</i> , <i>Salix atrocinerea</i> , <i>Populus nigra</i> , <i>S. alba</i>	<i>Prunus avium</i> , <i>Populus nigra</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>Rosa sp.</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Cytisus ladanifer</i> , <i>Lavandula stoechas</i>	<i>Cistus laurifolius</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>Rosa sp.</i> , <i>gramineas</i> , <i>Thymus sp.</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Trifolium sp.</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Thymus sp.</i> , <i>compositaceas</i>	<i>Lavandula stoechas</i> , <i>Thymus sp.</i>	-
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	<i>Cupressus arizonica</i> , <i>Pinus halepensis</i>
IO	4	4	1	2	2	4	4	2
AU	2	2,5	1,25	2,8	1,75	3,2	2	1,55
AT	2,55	2,5	1,5	3,05	2	3,8	2,55	2,07
AA	99	1,5	0,95	1,5	1,4	2,6	99	0,7
Nºh	5	5	3	6	4	7	5	4
H1	0,55	0,5	0,5	0,55	0,5	0,6	0,55	0,55
H2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,55	0,45	0,52
H3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,55	0,55	0,5
H4	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,55	0,5	0,5
H5	0,5	0,5	0	0,5	-	0,55	0,5	-
H6	-	-	-	0,5	-	0,5	-	-
H7	-	-	-	-	-	0,5	-	-

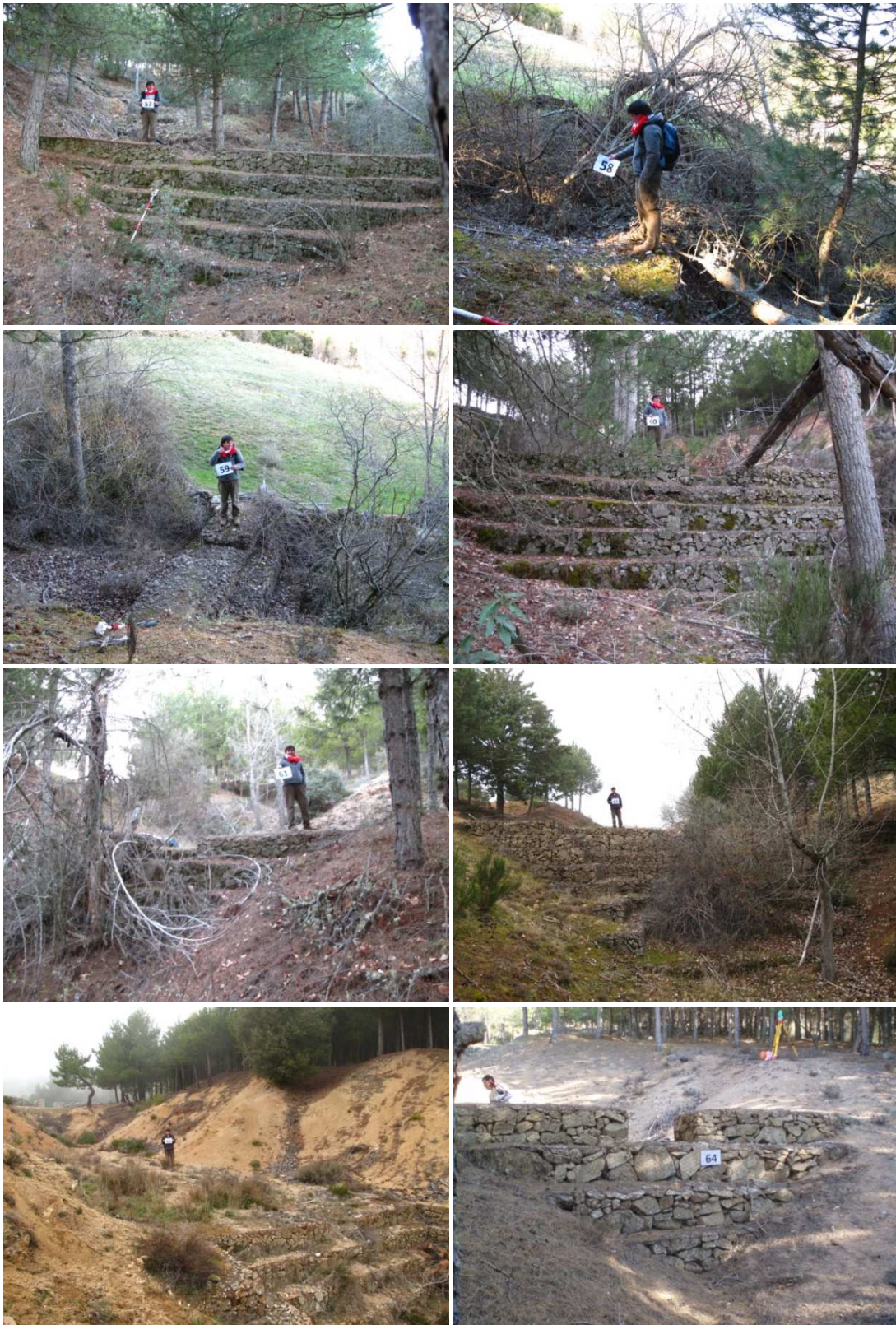


Figura A1.11. Fotos diques 57 a 64



Tabla A1.9. Resultados del inventario para los diques 65 a 72

Nº	65	66	67	68	69	70	71	72
UTM X	308041,6	308045,5	308130,5	308112,4	308102,6	308124,9	308111,5	308160,6
UTM Y	4493142,1	4493148,3	4493086,0	4493098,0	4493104,0	4493122,3	4493132,7	4493137,4
Fecha	03/01/2011	03/01/2011	06/07/2010	06/07/2010	06/07/2010	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011
Mod	2	1	1	2	2	2	2	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	6,7	9,7	4,9	8,8	7,5	6,45	7,55	11,25
a	2,85	-	4,9	4	4	2,85	2,85	4,95
b	0,95	-	-	0,86	0,7	0,8	0,85	1,4
c	2,9	-	-	3,94	2,8	2,8	3,95	4,9
Vtd	Sencillo	No	No	Si	Si	Sencillo	Sencillo	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	No	No	No
DEa	-	-	-	-	-	-	-	-
DEI	-	-	-	-	-	-	-	-
MC	No	No	No	No	No	No	No	No
EO	1	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	-	<i>Cistus ladanifer</i>	-	<i>Cytisus ladanifer</i> , <i>Quercus ilex</i>	<i>Cytisus ladanifer</i> <i>Thymus sp.</i> , <i>Lavandula stoechas</i>	<i>Rosa sp.</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Daphne gnidium</i> . <i>Quercus ilex</i>	<i>Cistus monpelienis</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Rosa sp.</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Lavandula stoechas</i> , <i>Cistus laurifolius</i>
Veg. Lad.	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Cistus ladanifer</i>	-	-	-	-	-	-	-
IO	2	1	3	4	4	4	4	4
AU	1	1,07	1,55	1,5	2,1	1,5	1,57	1,65
AT	1,52	1,07	1,55	2	2,6	2	2,15	2,25
AA	0,75	0,5	1,45	1,5	2,1	1,5	1,43	1,65
Nºh	3	2	3	4	5	4	4	4
H1	0,52	0,57	0,55	0,5	0,5	0,5	0,58	0,6
H2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,55	0,5	0,55	0,55
H3	0,5	-	0,5	0,5	0,55	0,5	0,47	0,55
H4	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,55	0,55
H5	-	-	-	-	0,5	-	-	-



Figura A1.12. Fotos diques 65 a 72



Tabla A1.10. Resultados del inventario para los diques 73 a 80

Nº	73	74	75	76	77	78	79	80
UTM X	308400,1	308495,9	308181,2	308242,0	308297,4	308295,7	308278,9	308330,8
UTM Y	4492995,6	4493011,4	4493149,9	4493186,9	4493235,0	4493274,3	4493303,1	4493211,1
Fecha	05/07/2010	05/07/2010	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011
Mod	1	1	2	1	2	2	2	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	7,3	12,9	7,6	9,9	7	9	12,8	6,65
a	-	-	2,83	-	3,9	3,9	4,8	2,9
b	-	-	0,57	-	0,8	1,1	1,1	0,9
c	-	-	4,2	-	2,3	4	6,9	2,85
Vtd	No	No	Sencillo	No	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	No	No	No
DEa	-	-	-	-	-	-	-	-
DEl	-	-	-	-	-	-	-	-
MC	No	No	No	No	No	No	No	No
EO	En ruina	1	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Rubus</i> sp., <i>Salix alba</i> , <i>Populus nigra</i> , <i>Ulmus minor</i>	<i>Cistus laurifolius</i>	<i>Cistus ladanifer</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Ulex europaeus</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Cistus laurifolius</i>	<i>Cistus laurifolius</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Cistus laurifolius</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	2	2	4	4	2	4	4	4
AU	1,3	1,8	1	1,05	2,2	1,6	3,4	1,65
AT	1,3	1,8	1,6	1,05	2,8	2,15	4,05	2,2
AA	0,4	0,66	1	0,99	1,6	1,6	3,17	1,5
Nºh	2	3	3	2	5	4	7	4
H1	0,55	0,6	0,6	0,55	0,6	0,55	0,65	0,55
H2	0,75	0,6	0,5	0,5	0,6	0,55	0,6	0,6
H3	-	0,6	0,5	-	0,6	0,55	0,55	0,55
H4	-	-	-	-	0,5	0,5	0,57	0,5
H5	-	-	-	-	0,5	-	0,6	-
H6	-	-	-	-	-	-	0,53	-
H7	-	-	-	-	-	-	0,55	-

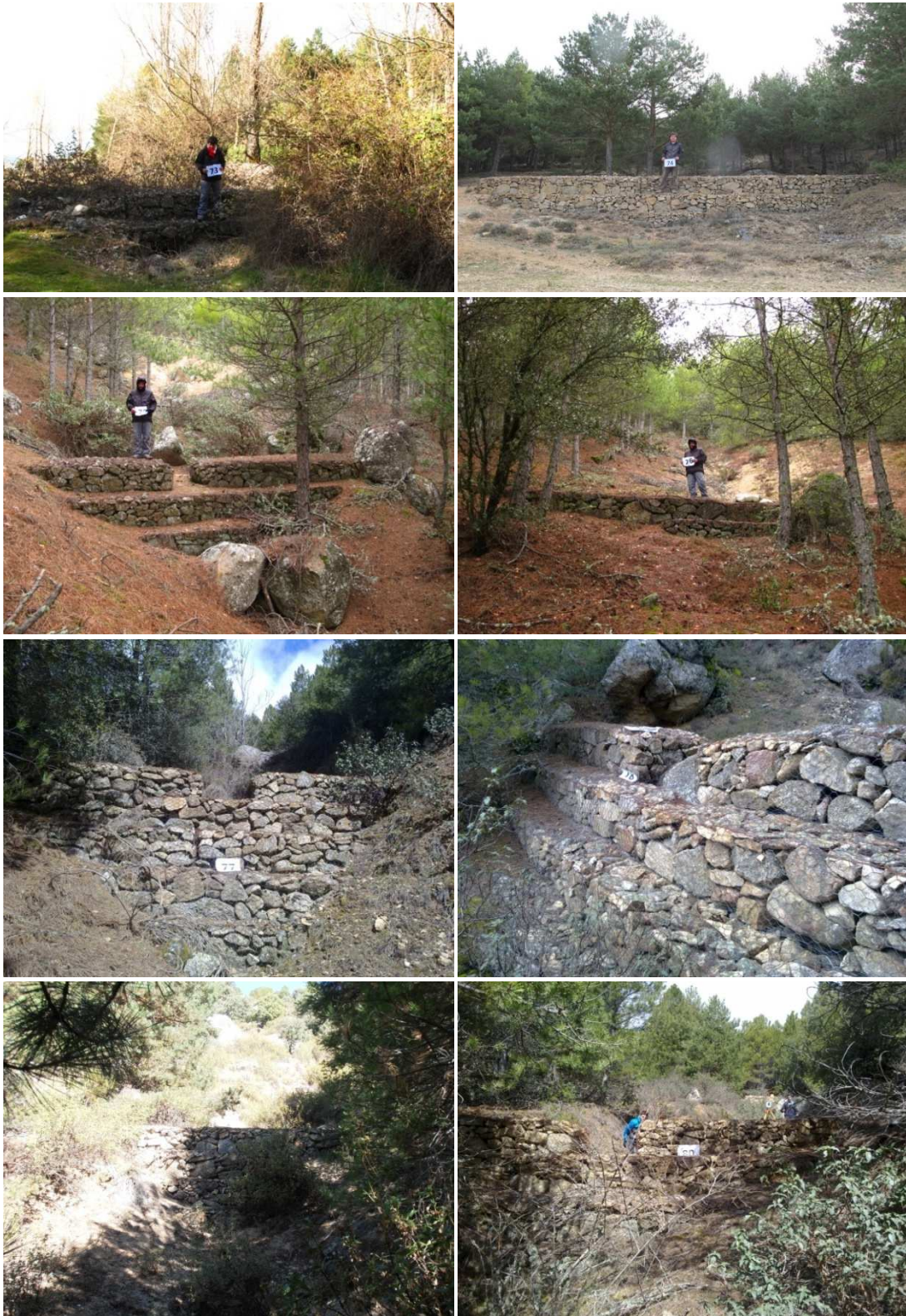


Figura A1.13. Fotos diques 73 a 80



Tabla A1.11. Resultados del inventario para los diques 81 a 88

Nº	81	82	83	84	85	86	87	88
UTM X	308319,5	308306,6	308308,8	308307,4	308303,0	308444,2	308437,3	308403,4
UTM Y	4493246,3	4493271,2	4493293,2	4493318,7	4493333,2	4493103,3	4493152,7	4493189,3
Fecha	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	03/01/2011	05/07/2010	28/11/2010	28/11/2010
Mod	2	5	1	2	1	5	2	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	9,8	7	7,9	9,65	12	23,4	9	9,6
a	3,8	2	-	6,6	-	11,8	4,8	4
b	1,1	1	-	1,1	-	1,65	0,9	0,9
c	4,9	4	-	1,95	-	9,4	3,3	4,7
Vtd	Sencillo	Sencillo	No	Sencillo	No	Trapezoidal	Sencillo	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	No	No	No
DEa	-	-	-	-	-	-	-	-
DEl	-	-	-	-	-	-	-	-
MC	No	Si	No	No	No	Si	No	No
EO	1	1	1	1	6	1	1	1
Veg. At.	<i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Cistus laurifolius</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>P. halepensis</i> , <i>Cistus laurifolius</i> , <i>Ulex europaeus</i> , <i>Lavandula stoechas</i>	<i>Cistus ladanifer</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Lavandula stoechas</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus halepensis</i>	<i>Populus nigra</i> , <i>Rosa</i> sp., <i>Salix</i> sp.	-	<i>Pinus pinaster</i> , <i>Cistus scoparius</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	2	2	3	4	4	1	4	3
AU	2,82	2,68	1,67	2,7	2,21	5,21	2,6	3,2
AT	3,42	3,26	2,24	3,25	2,21	5,76	3,15	3,75
AA	1,48	2,18	1,53	2,24	2,21	0	2,6	3,2
Nºh	6	6	4	6	4	10	6	7
H1	0,6	0,58	0,57	0,55	0,53	0,8	0,55	0,55
H2	0,57	0,58	0,57	0,55	0,53	0,55	0,6	0,55
H3	0,6	0,55	0,55	0,55	0,6	0,55	0,5	0,55
H4	0,58	0,55	0,55	0,5	0,55	0,6	0,5	0,55
H5	0,57	0,5	-	0,55	-	0,5	0,5	0,5
H6	0,5	0,5	-	0,55	-	0,6	0,5	0,55
H7	-	-	-	-	-	0,63	-	0,5
H8	-	-	-	-	-	0,5	-	-
H9	-	-	-	-	-	0,53	-	-
H10	-	-	-	-	-	0,5	-	-



Figura A1.14. Fotos diques 81 a 88



Tabla A1.12. Resultados del inventario para los diques 89 a 96

Nº	89	90	91	92	93	94	95	96
UTM X	308379,8	308432,7	308401,9	308435,7	308411,9	308393,3	308408,9	308496,5
UTM Y	4493204,9	4493189,3	4493225,2	4493215,9	4493245,8	4493294,0	4493322,1	4493120,5
Fecha	28/11/2010	28/11/2010	28/11/2010	28/11/2010	28/11/2010	28/11/2010	28/11/2010	05/07/2010
Mod	1	2	1	2	1	2	2	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	5,7	10,7	7,9	10,85	9,7	15	15,4	18,68
a	-	5,7	-	4,8	-	5,9	5,45	7,7
b	-	1	-	1,1	-	1	1,25	2,18
c	-	4	-	4,95	-	8,1	8,8	8,8
Vtd	-	Elevado	-	Elevado	-	Elevado	Elevado	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	No	No	No
DEa	-	-	-	-	-	-	-	-
DEI	-	-	-	-	-	-	-	-
MC	No	No	No	No	No	No	No	No
EO	1	1	1	1	1	7	1	1
Veg. At.	<i>Pinus pinaster</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>P. sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Cistus scoparius</i> , <i>Lavandula stoechas</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>P. pinaster</i> , <i>Cistus ladanifer</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>P. pinaster</i> , <i>Cistus scoparius</i> , <i>Lavandula stoechas</i> , <i>Thymus sp.</i>	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>P. pinaster</i> ,	-	<i>Cytisus scoparius</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Lavandula stoechas</i> , <i>Quercus ilex</i>	<i>Populus nigra</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Rubus sp.</i> , <i>Cistus laurifolius</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Juglans regia</i>
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	2	3	2	4	4	4	3	2
AU	2,3	4,58	1,74	4,66	1,67	2,94	3,58	3,85
AT	2,3	4,87	1,74	4,96	1,67	3,23	3,83	4,42
AA	1,61	3,91	1,39	4,41	1,67	2,94	3,23	1,4
Nºh	4	9	3	9	3	6	7	7
H1	0,6	0,57	0,53	0,55	0,57	0,54	0,55	0,57
H2	0,55	0,5	0,53	0,58	0,54	0,52	0,54	0,55
H3	0,55	0,57	0,58	0,58	0,56	0,53	0,55	0,5
H4	0,55	0,5	-	0,55	-	0,55	0,55	0,55
H5	-	0,55	-	0,56	-	0,54	0,55	0,5
H6	-	0,53	-	0,54	-	0,55	0,54	0,5
H7	-	0,55	-	0,55	-	-	0,55	0,6
H8	-	0,55	-	0,55	-	-	-	0,65
H9	-	0,55	-	0,5	-	-	-	-



Figura A1.15. Fotos diques 89 a 96



Tabla A1.13. Resultados del inventario para los diques 97 a 105

Nº	97	98	99	100	101	102	103	104	105
UTM X	308542,5	308590,7	308624,8	308651,3	308675,1	308695,0	308731,4	308602,0	308583,7
UTM Y	4493134,8	4493148,8	4493159,1	4493173,5	4493189,7	4493210,5	4493242,8	4492646,5	4492665,8
Fecha	05/07/2010	05/07/2010	05/07/2010	05/07/2010	05/07/2010	05/07/2010	05/07/2010	20/10/2010	20/10/2010
Mod	4	2	4	2	3	4	4	3	2
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	20,8	16	10,2	12	16,6	20	-	16,1	8,7
a	9,8	7,5	4,2	6	8,4	10	-	4,6	3,9
b	2,2	1,85	2	2	1,9	1	-	0,9	0,9
c	8,8	6,65	4	4	6,3	9	-	10,6	3,9
Vtd	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo	-
DE	Si	No	Si	No	No	Si	Si	No	No
DEa	3,5	-	3,7	-	-	3,8	4	-	-
DEI	4,75	-	3,5	-	-	3,7	4,3	-	-
MC	Si	No	No	No	Si	Si	Si	Si	No
EO	1	1	1	1	1	1	6	1	1
Veg. At.	<i>Populus nigra</i> , <i>Rosa</i> sp., <i>Salix</i> sp., <i>Rubus</i> sp.	<i>Salix atrocinerea</i> , <i>S. alba</i>	<i>Populus nigra</i> , <i>Salix</i> sp., <i>Rubus</i> sp.	<i>Populus nigra</i> , <i>Prunus avium</i>	<i>Populus nigra</i> , <i>Rubus</i> sp.	<i>Populus nigra</i> , <i>Pinus sylvestris</i>	<i>Populus nigra</i> , <i>Cistus laurifolius</i> , <i>Prunus avium</i>	<i>Rubus</i> sp.	Gramíneas
Veg. Lad.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IO	2	2	4	3	3	4	4	2	2
AU	4,33	3,65	3,25	4,34	1,6	4,81	5,3	2	3,2
AT	4,93	4,25	3,8	4,85	2,2	4,79	5,9	2,55	3,75
AA	1,1	2,65	2,5	4,04	0,85	4,19	5,3	2	3,2
Nºh	9	8	5	7	7	9	11	5	7
H1	0,6	0,6	0,55	0,55	0,6	0,6	0,6	0,55	0,55
H2	0,52	0,5	0,55	0,55	0,5	0,55	0,55	0,5	0,5
H3	0,53	0,5	0,52	0,55	0,55	0,53	0,5	0,5	0,5
H4	0,53	0,55	0,5	0,55	0,55	0,5	0,6	0,5	0,5
H5	0,53	0,5	0,5	0,55	NP	0,58	0,6	0,5	0,5
H6	0,55	0,55	-	0,55	NP	0,5	0,5	-	0,6
H7	0,55	0,55	-	0,55	NP	0,55	0,5	-	0,6
H8	0,56	0,5	-	0,5	-	0,55	0,55	-	-
H9	0,56	-	-	0,5	-	0,5	0,5	-	-
H10	-	-	-	-	-	0,55	0,5	-	-
H11	-	-	-	-	-	0	0,5	-	-



Figura A1.16. Fotos diques 97 a 105



Tabla A1.14. Resultados del inventario para los diques 106 a 114

Nº	106	107	108	109	110	111	112	113	114
UTM X	308591,5	308603,1	308652,5	308661,5	308671,6	308679,8	308684,3	308816,4	308815,2
UTM Y	4492707,8	4492679,1	4492661,1	4492716,2	4492723,9	4492656,6	4492696,4	4492687,2	4492719,8
Fecha	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010
Mod	1	2	3	1	3	3	1	3	4
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	8,2	14,5	11,8	6	10,5	11,6	7	11,4	10,8
a	8,2	6,5	6,3	6	5,1	4,1	7	4,3	4,8
b	-	0,8	1,4	-	1	0,9	-	1,6	1,1
c	-	6,8	4,1	-	4,4	6,6	-	5,5	4,9
Vtd	No	Sencillo	Sencillo	No	Sencillo	Sencillo	No	Sencillo	Sencillo
DE	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
DEa	-	-	-	-	-	-	-	-	2
DEI	-	-	-	-	-	-	-	Muy ligero desestribado	2,6
MC	No	No	Si	No	Si	No	No	No	Si
EO	1	1	7	1	1	1	1	1	1
Veg. At.	<i>Rubus</i> sp.	<i>Quercus ilex</i> , <i>Populus nigra</i>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Rubus</i> sp.	-	<i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Lavandula stoechas</i>	<i>Thymus vulgaris</i>	-	<i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Lavandula stoechas</i>	<i>Cytisus scoparius</i> , <i>Stipa gigantea</i> , <i>Thymus vulgaris</i> , <i>Lavandula stoechas</i>
Veg. Lad.	3	1	5	5	5	1	3	1	1
IO	4	4	4	4	4	2	4	4	2
AU	2,15	4,09	2,65	1	2,65	2	2,05	3,2	3,85
AT	2,15	4,55	3,2	1	3,25	2,5	2,05	3,7	4,35
AA	2,15	4,09	2,25	1	2,65	1,7	2,05	2,36	3,85
Nºh	4	9	5	2	6	5	4	7	6
H1	0,55	0,5	0,55	0,5	0,6	0,5	0,55	0,5	0,6
H2	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,5	0,55	0,55
H3	0,55	0,5	0,5	-	0,55	0,5	0,5	0,55	0,55
H4	0,5	0,55	0,55	-	0,55	0,5	0,5	0,55	0,55
H5	-	0,5	0,5	-	0,5	0,5	-	0,55	0,55
H6	-	0,5	0,55	-	0,5	-	-	0,5	0,55
H7	-	0,5	-	-	-	-	-	0,5	0,5
H8	-	0,5	-	-	-	-	-	-	0,5
H9	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-



Figura A1.17. Fotos diques 106 a 114



Tabla A1.15. Resultados del inventario para los diques 115 a 123

Nº	115	116	117	118	119	120	121	122	123
UTM X	308887,4	308885,3	308880,4	308919,8	308925,9	308942,3	308963,0	308979,7	309001,2
UTM Y	4492694,7	4492723,7	4492749,4	4492668,7	4492734,3	4492747,2	4492755,5	4492740,4	4492689,5
Fecha	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010	20/10/2010
Mod	4	1	1	2	2	1	1	2	1
Material	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada	M. gavionada
Rft	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
ECv	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ECa	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LC	13,2	5,9	9,9	9,85	14,8	10,8	9	11	10,8
a	4,9	5,9	9,9	3,85	8	10,8	9	5,6	10,8
b	1,1	-	-	1	1	-	-	1	-
c	7,2	-	-	5	5,8	-	-	4,4	-
Vtd	Sencillo	No	No	Sencillo	Sencillo	No	No	Sencillo	No
DE	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
DEa	2	-	-	-	-	-	-	-	-
DEI	2,5	-	-	-	7 Pequeña rotura de malla	-	-	-	-
MC	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
EO	1	1	1	1	6	5	1	1	1
Veg. At.	<i>Quercus ilex</i>	<i>Thymus vulgaris, Lavandula stoechas y Daphne gnidium</i>	<i>Lavandula stoechas, Thymus vulgaris, Stipa gigantea, Cistus laurifolius</i>	-	<i>Pinus sylvestris, Thymus vulgaris, Lavandula stoechas, Digitalis sp., Stipa gigantea</i>	<i>Lavandula stoecha, Stipa gigantea</i>	-	<i>Pinus sp.</i>	<i>Quercus ilex</i>
Veg. Lad.	1	4	1	1	5	5	3	1	3
IO	3	3	4	2	4	4	4	3	2
AU	2,65	2,75	2,7	2,75	2,55	2,6	2,65	2,85	2,55
AT	3,35	2,75	2,7	3,3	3,15	2,6	2,65	3,25	2,55
AA	2,4	2,75	2,08	1,55	2	2,36	2,45	2,2	1,43
Nºh	6	5	5	6	6	5	6	6	5
H1	0,6	0,55	0,55	0,55	0,6	0,55	0,55	0,5	0,5
H2	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5	0,55	0,55	0,55	0,5
H3	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5	0,5	0,55	0,55	0,5
H4	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5	0,5	0,55	0,5
H5	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,5	0,5	0,55	0,55
H6	0,4	-	-	0,55	0,5	-	-	0,55	-



Figura A1.18. Fotos diques 115 a 123

ANEXO II:

**Datos y resultados de la aplicación
de las metodologías de cálculo del
volumen de sedimentos**



A2.1. DATOS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación se exponen los datos y los resultados de la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo (Díaz *et al.*, 2014) para la obtención del volumen de sedimentos retenidos en cada dique de la restauración de Tórtoles.

Dique 1

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos (Tabla A2.1) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentos, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.1 a A2.8).

Tabla A2.1. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,5	1,5586	1,7391	1	2,4161	2,2806
2		0,7602		3		
2	1,5	0,7602	0,7447	2	0,8920	0,6981
3		0,2327		4		
3	1,5	0,2327	0,2442	3	0,3469	0,2787
4		0,0929		5		
4	1,5	0,0929	0,1368	4	0,3012	0,2685
5		0,0895		6		
5	1,5	0,0895	0,1808	5	0,3944	0,4545
6		0,1515		7		
6	1,5	0,1515	0,1836	6	0,6624	0,2799
7		0,0933		8		
7	1,5	0,0933	0,6700	7	1,1527	1,68
8		0,8000		Fin cuña		
8	0,6	0,8000	0,2400	Opción 1	4,3100	4,6938
Fin cuña		0		Opción 2		
Volumen total			4,1391		4,0723	3,9597
Errores			A₁= 0,0668		A₂= -0,1126	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

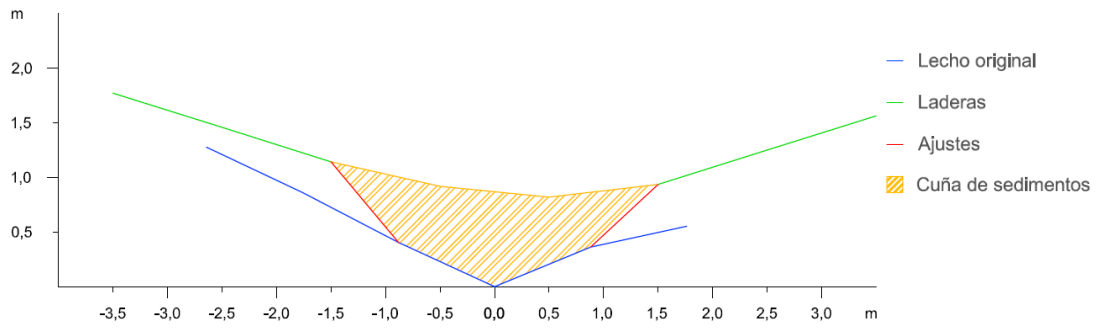


Figura A2.1. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

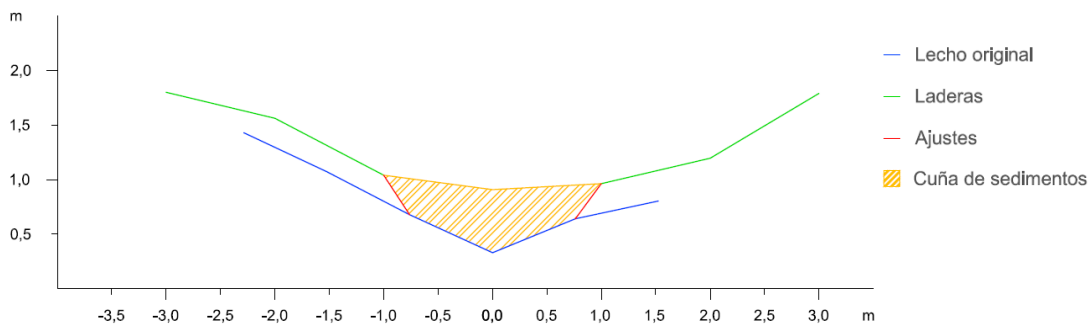


Figura A2.2. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

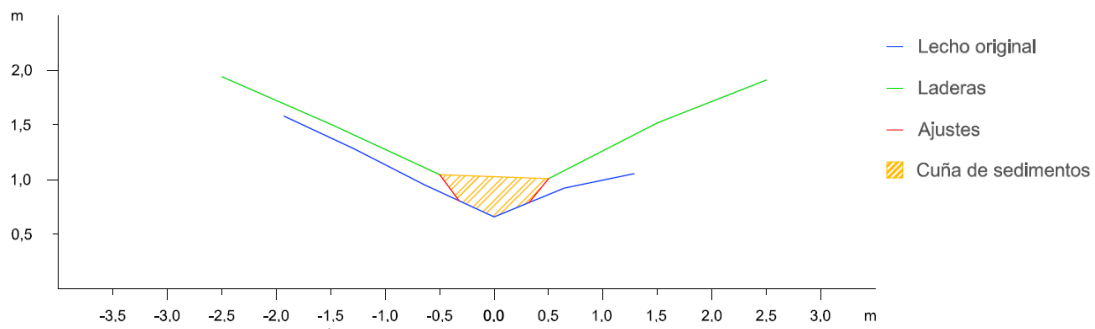


Figura A2.3. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

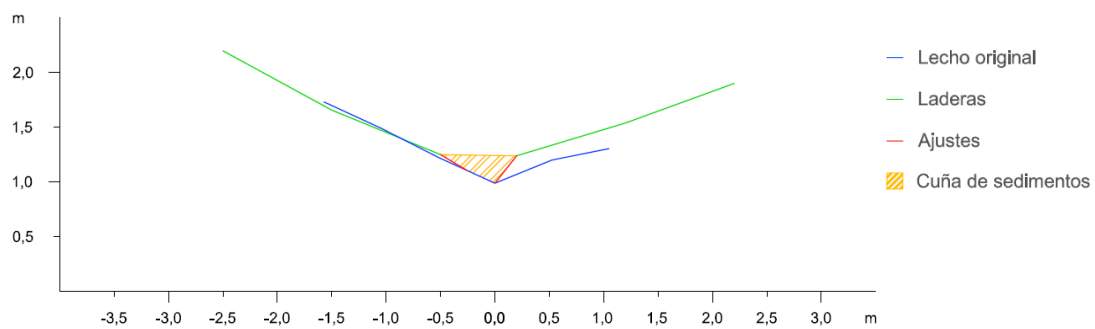


Figura A2.4. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

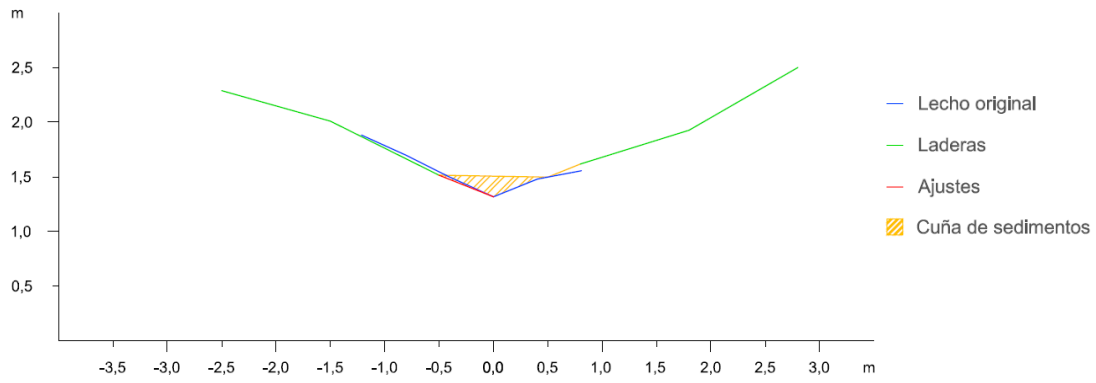


Figura A2.5. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

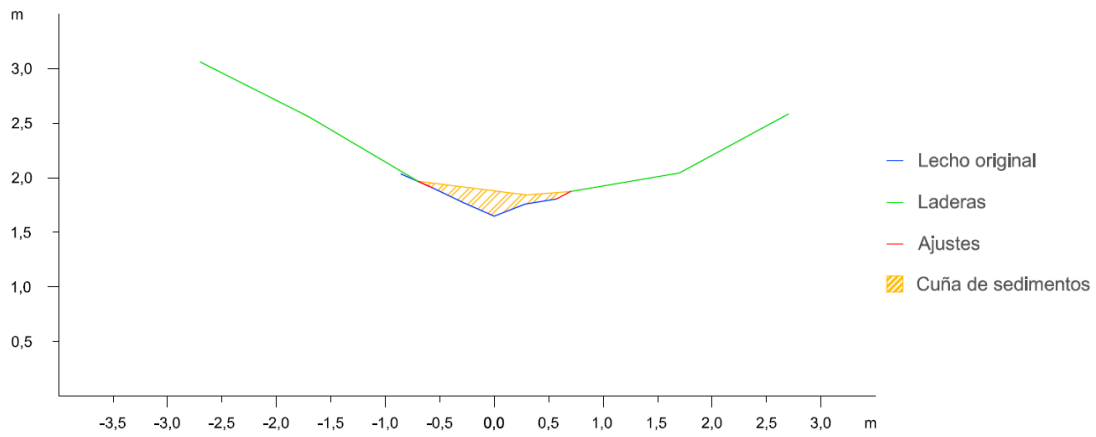


Figura A2.6. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

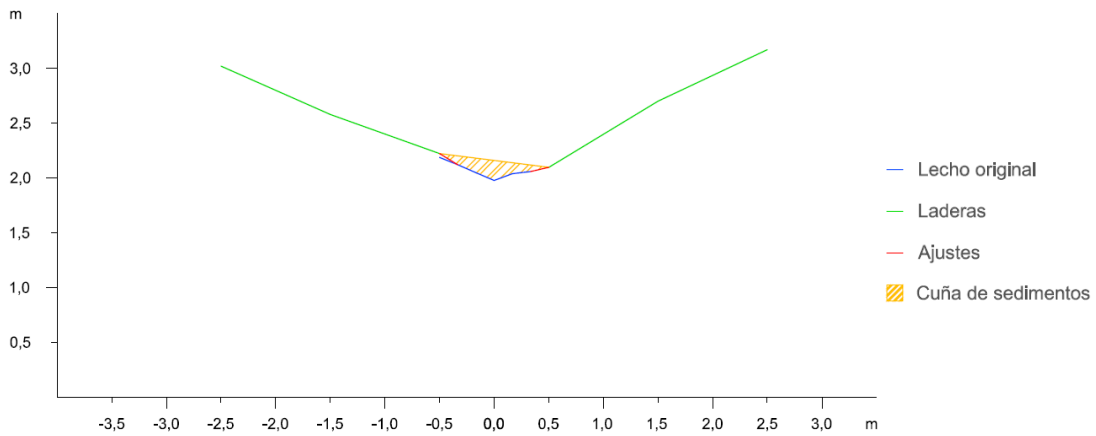


Figura A2.7. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

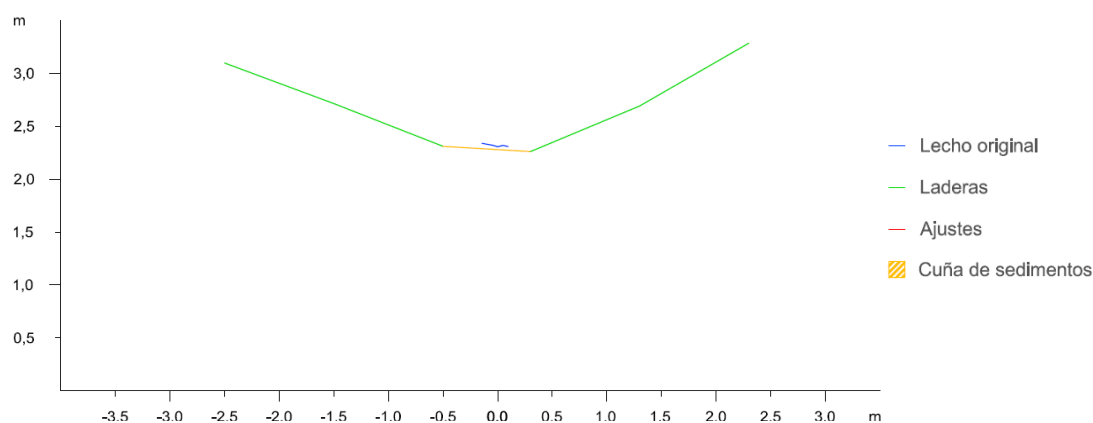


Figura A2.8. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 1

Dique 2

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 2 (Tabla A2.2) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.9 a A2.17).

Tabla A2.2. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,1765	0,9927	1	1,6164	1,6178
2		0,8089		3		
2	1,0	0,8089	0,6230	2	0,9152	0,8742
3		0,4371		4		
3	1,0	0,4371	0,3127	3	0,4138	0,3764
4		0,1882		5		
4	1,0	0,1882	0,1199	4	0,1459	0,1030
5		0,0515		6		
5	1,0	0,0515	0,0475	5	0,0862	0,0870
6		0,0435		7		
6	1,0	0,0435	0,0383	6	0,0715	0,0662
7		0,0331		8		
7	1,0	0,0331	0,0359	7	0,0731	0,0772
8		0,0386		9		
8	1,0	0,0386	0,0352	8	0,0415	0,0477
9		0,0318		Fin cuña		
9	0,5	0,0318	0,0080	Opción 1	2,1975	2,1664
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			2,2130		2,1821	2,1251
Errores			A ₁ = 0,0309		A ₂ = -0,0570	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

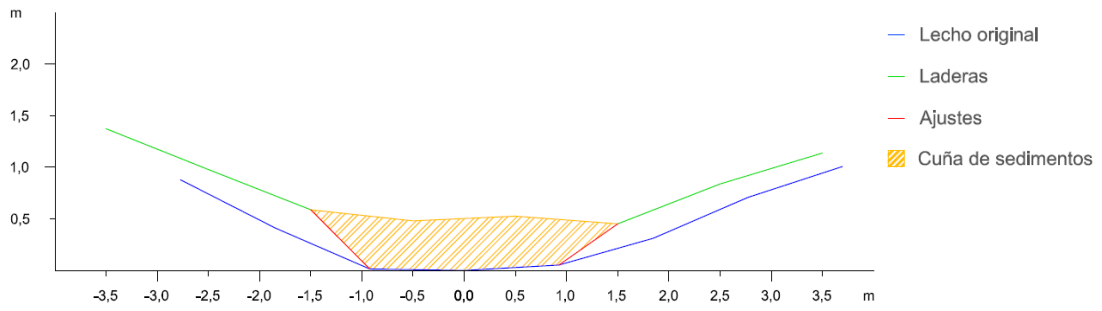


Figura A2.9. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

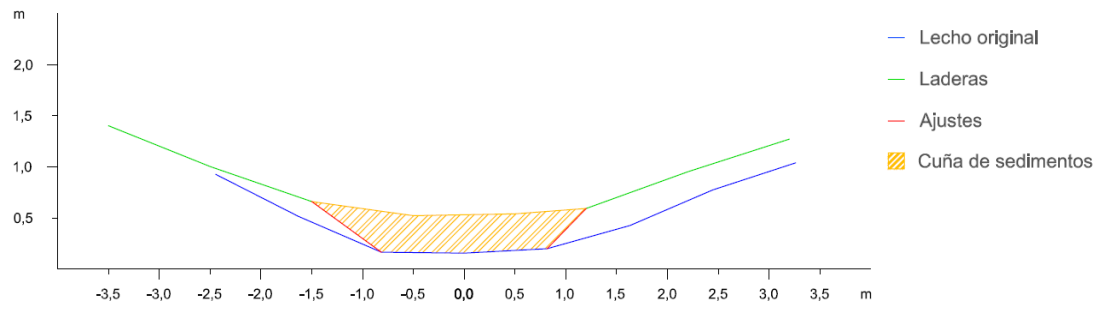


Figura A2.10. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

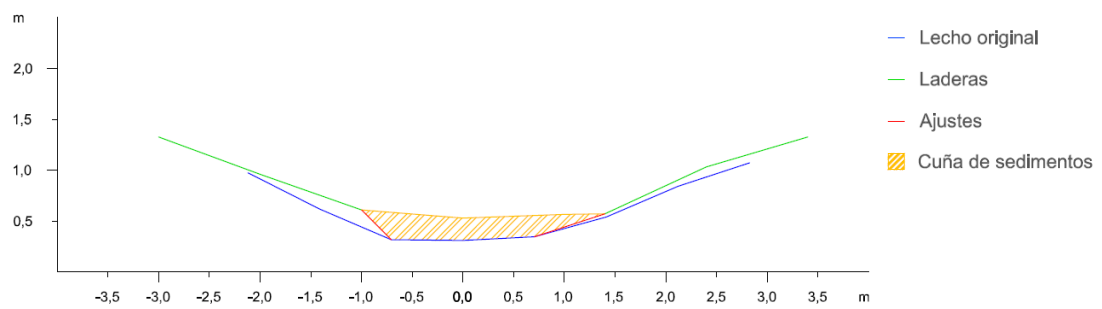


Figura A2.11. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

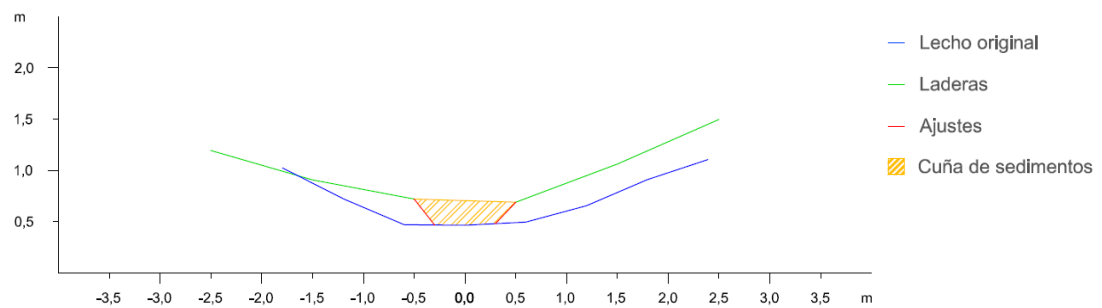


Figura A2.12. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

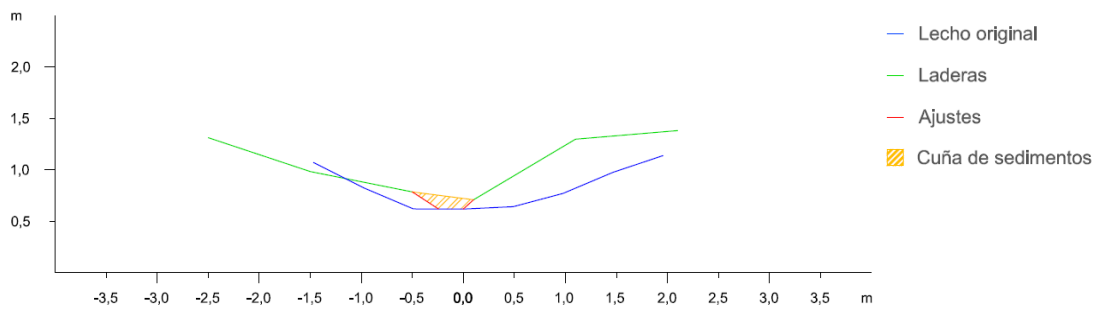


Figura A2.13. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

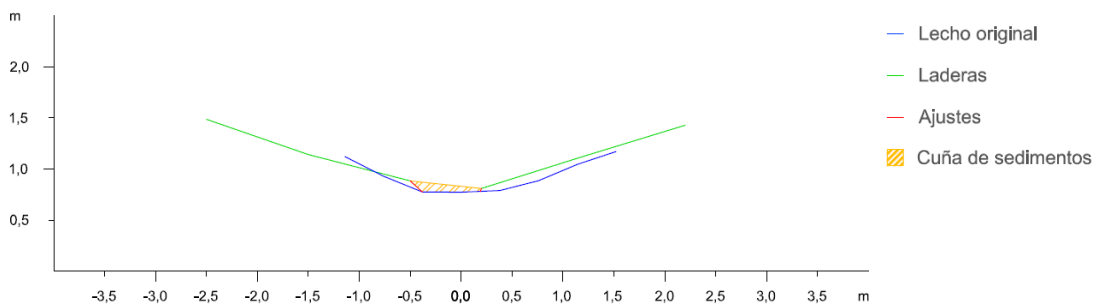


Figura A2.14. Sección trasversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

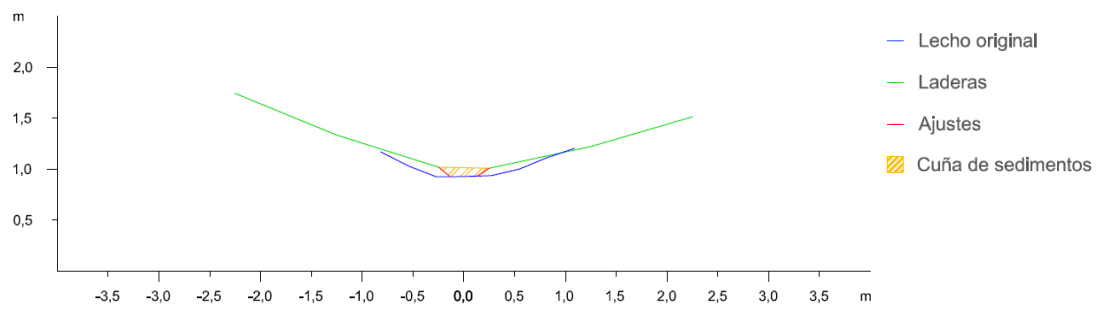


Figura A2.15. Sección trasversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

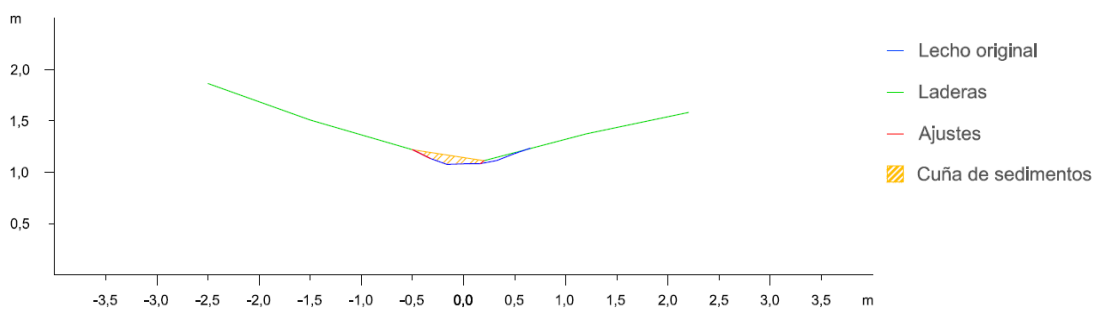


Figura A2.16. Sección trasversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

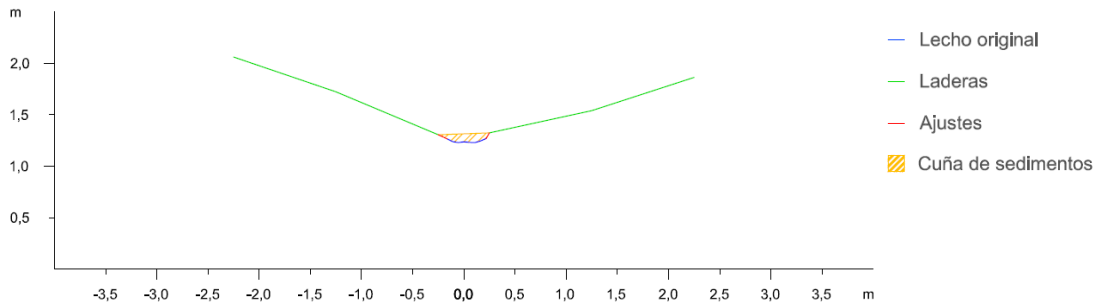


Figura A2.17. Sección transversal 9 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 2

Dique 3

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 3 (Tabla A2.3) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.18 a A2.24).

Tabla A2.3. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,6217	1,2238	1	1,82086667	1,6516
2		0,8258		3		
2	1,0	0,8258	0,6818	2	1,05323333	1,0754
3		0,5377		4		
3	1,0	0,5377	0,3604	3	0,43473333	0,3662
4		0,1831		5		
4	1,0	0,1831	0,1086	4	0,11603333	0,0682
5		0,0341		6		
5	1,0	0,0341	0,0314	5	0,06196667	0,0572
6		0,0286		7		
6	1,0	0,0286	0,0330	6	0,05346	0,06732
7		0,0374		Fin cuña		
7	0,8	0,0374	0,0150	Opción 1	2,33252667	2,08996
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			2,45381		2,38950167	2,262315
Errores			A ₁ = 0,0643		A ₂ = -0,1272	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

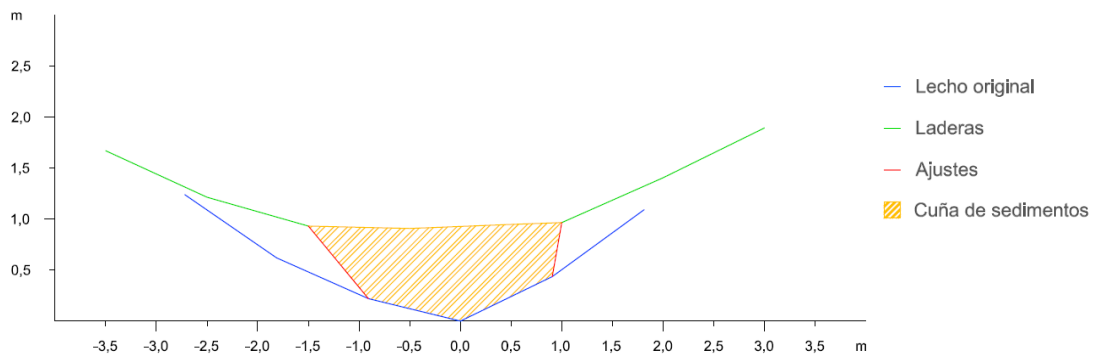


Figura A2.18. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

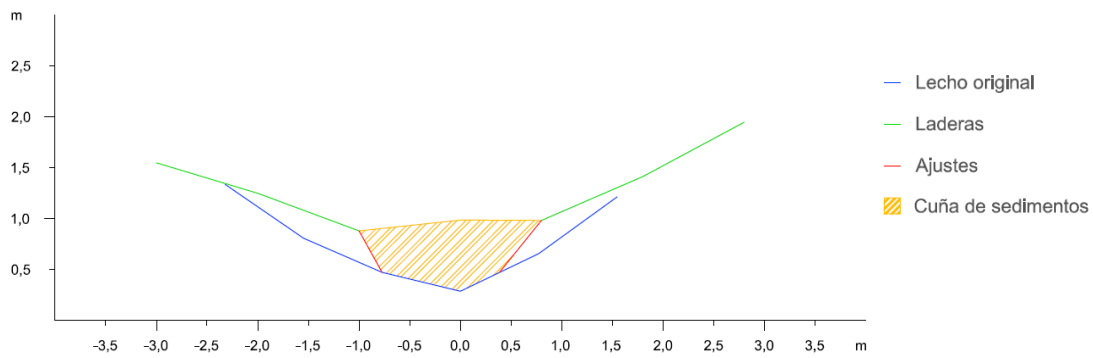


Figura A2.19. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

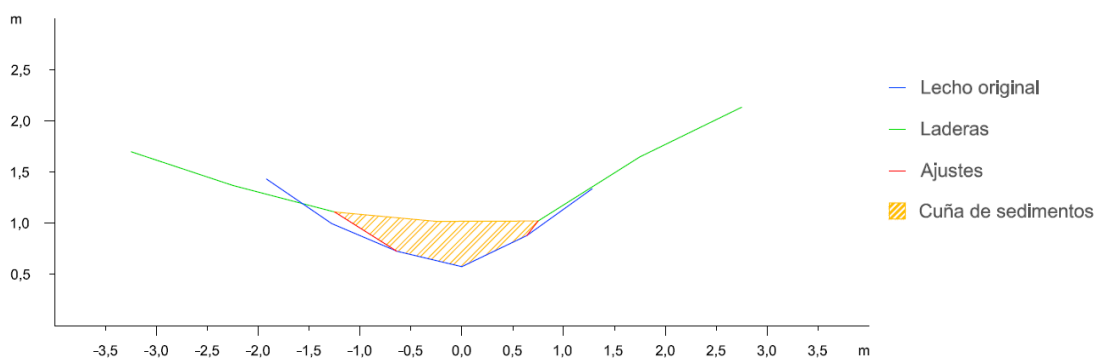


Figura A2.20. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

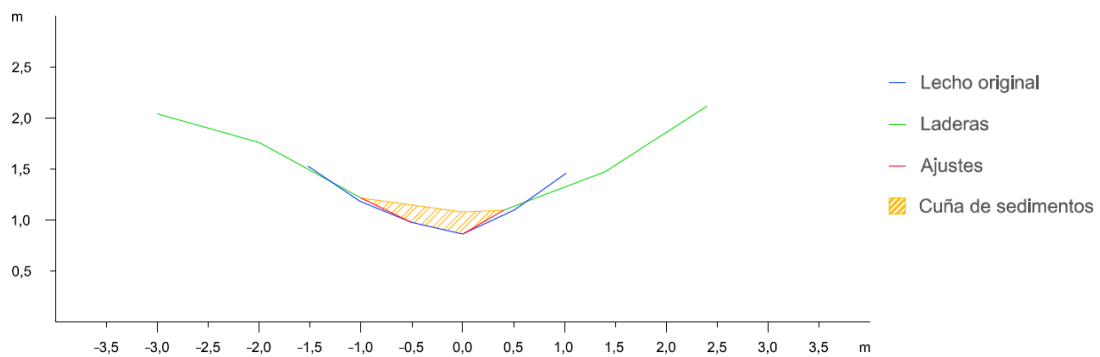


Figura A2.21. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

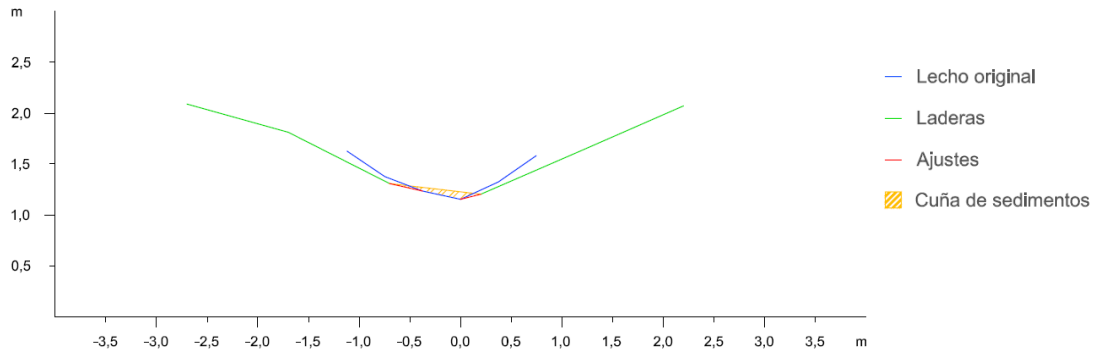


Figura A2.22. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

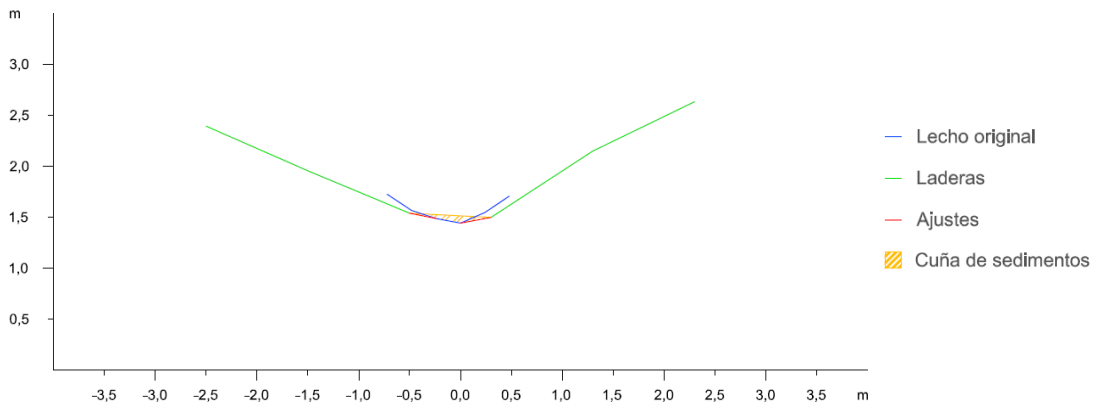


Figura A2.23. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

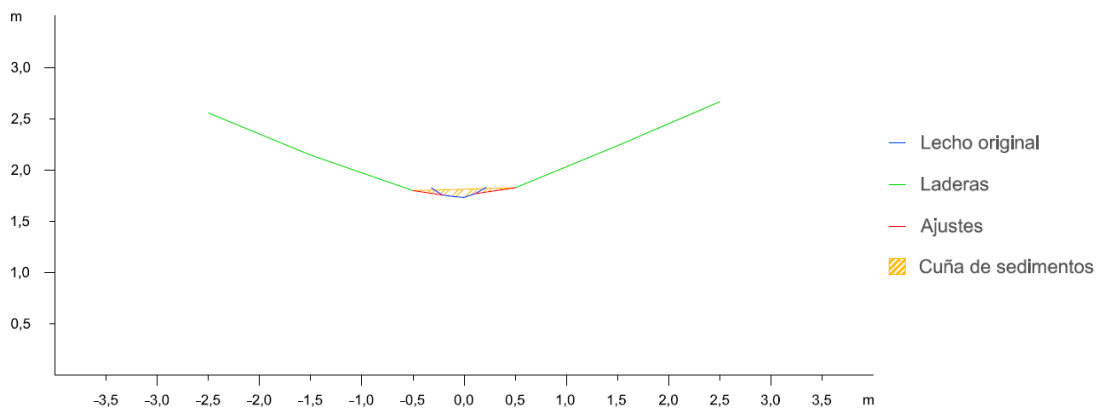


Figura A2.24. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 3

Dique 4

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 4 (Tabla A2.4) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.25 a A2.32).



Tabla A2.4. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,5	14,4523	19,4080	1	34,0725	34,2750
2		11,4250		3		
2	1,5	11,4250	14,5632	2	24,2649	23,9778
3		7,9926		4		
3	1,5	7,9926	9,8453	3	15,7870	15,4032
4		5,1344		5		
4	1,5	5,1344	6,1336	4	9,3045	9,1311
5		3,0437		6		
5	1,5	3,0437	3,2576	5	4,3729	3,8994
6		1,2998		7		
6	1,5	1,2998	1,3520	6	1,7318	1,5087
7		0,5029		8		
7	1,5	0,5029	0,4913	7	0,3891	0,3196
8		0,1522		Fin cuña		
8	0,6	0,1522	0,0457	Opción 1	54,6214	53,8972
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			55,096635		54,6881	53,9842
Errores			A ₁ = 0,4085		A ₂ = -0,7039	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

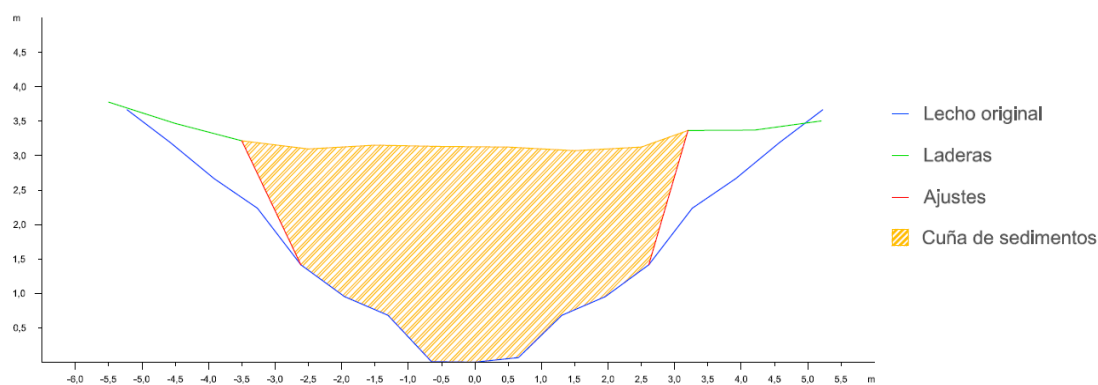


Figura A2.25. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

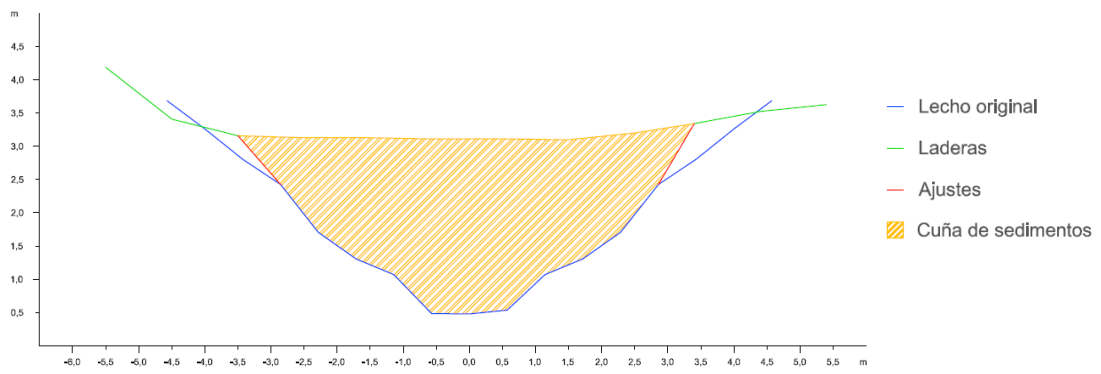


Figura A2.26. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

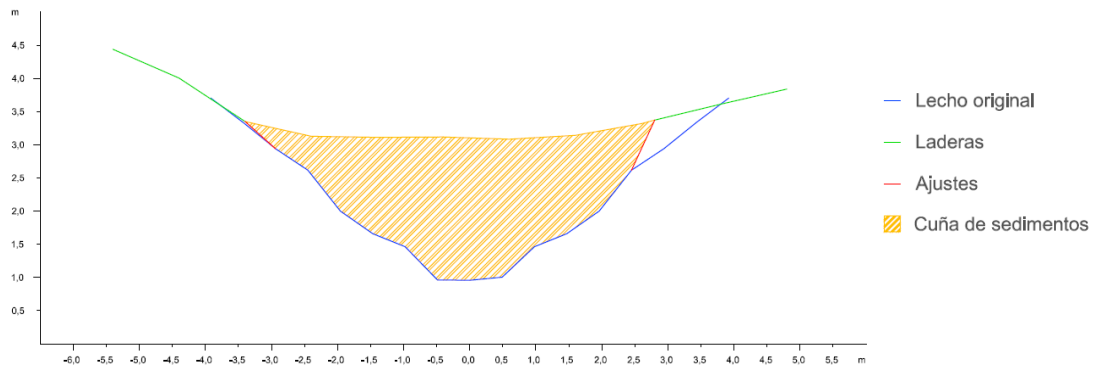


Figura A2.27. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

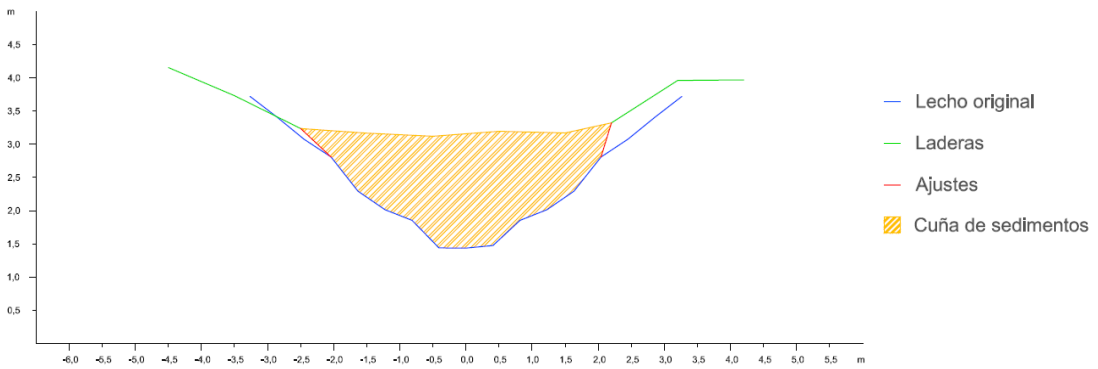


Figura A2.28. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

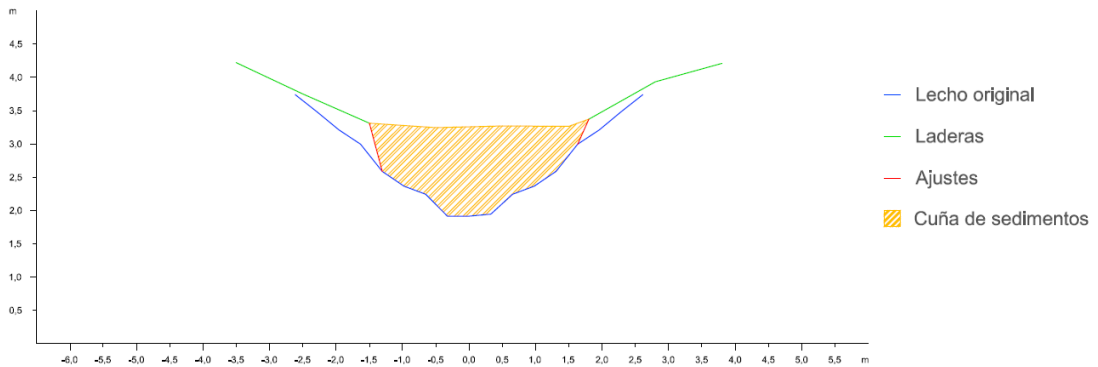


Figura A2.29. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

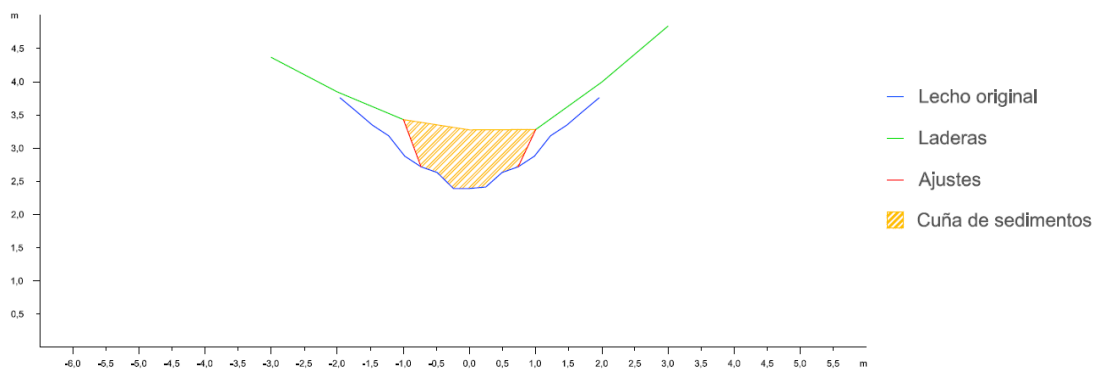


Figura A2.30. Sección trasversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

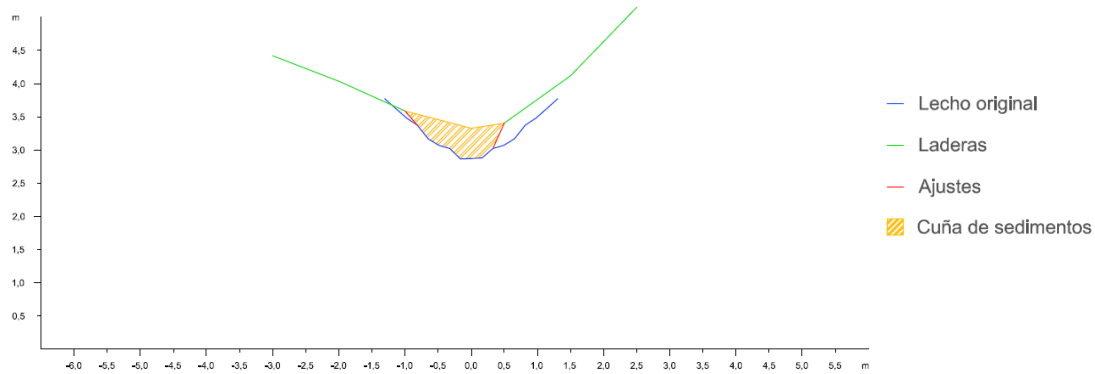


Figura A2.31. Sección trasversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

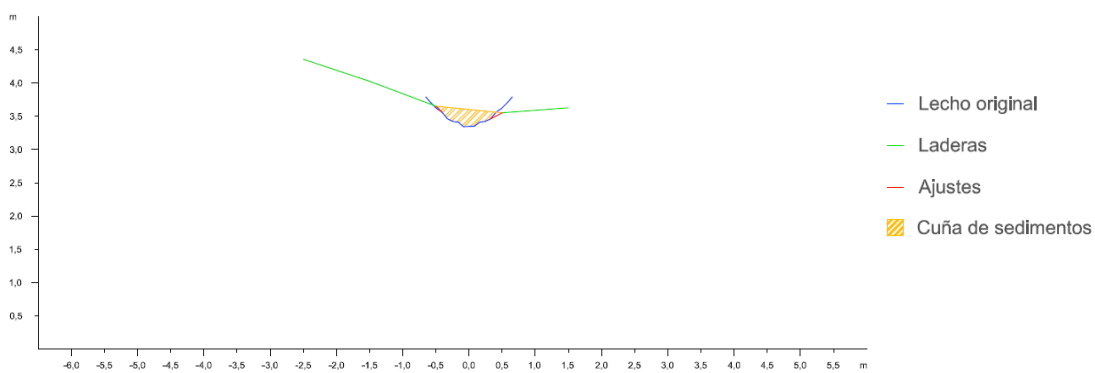


Figura A2.32. Sección trasversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 4

Dique 5

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 5 (Tabla A2.5) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.33 a A2.36).



Tabla A2.5. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 5

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	11,7846	26,5577	1	38,4383	35,5230
2		5,9205		3		
2	3,0	5,9205	13,3383	2	18,6385	17,8302
3		2,9717		4		
3	3,0	2,9717	5,7044	3	6,2965	4,9872
4		0,8312		5		
4	3,0	0,8312	1,2468	Opción 1	44,7348	40,5102
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			46,8471		45,58875	43,072425
Errores			A ₁ = 1,2582		A ₂ = -2,5165	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

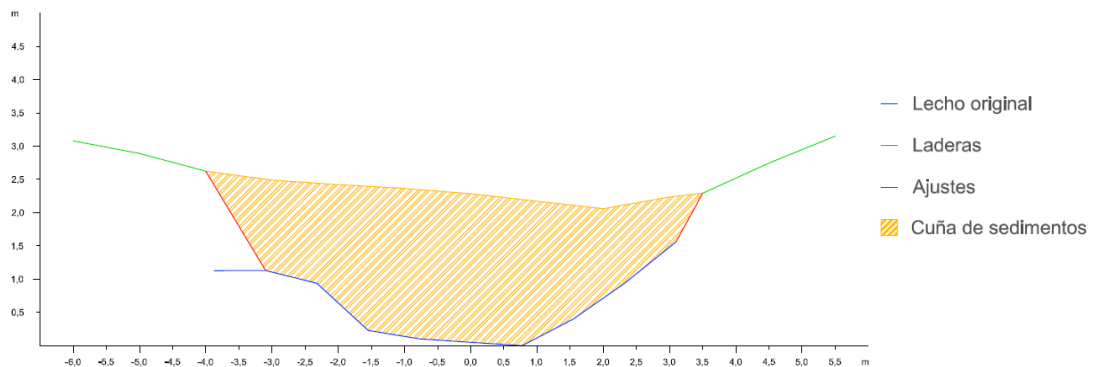


Figura A2.33. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5

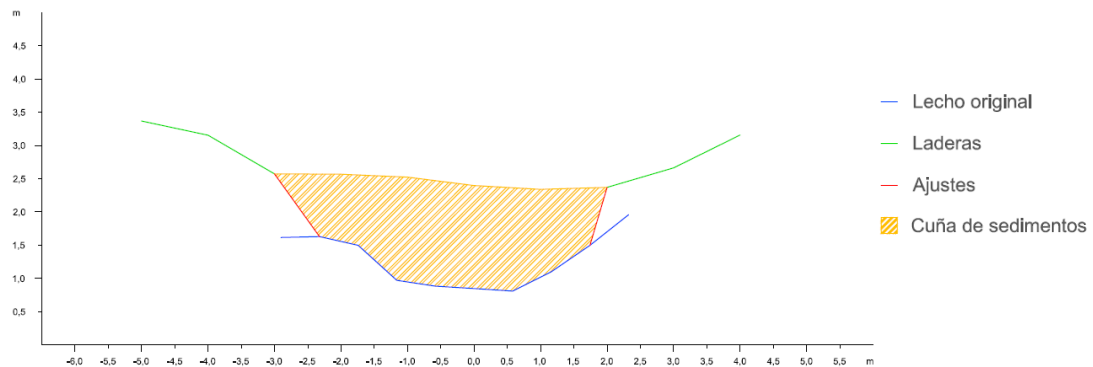


Figura A2.34. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5

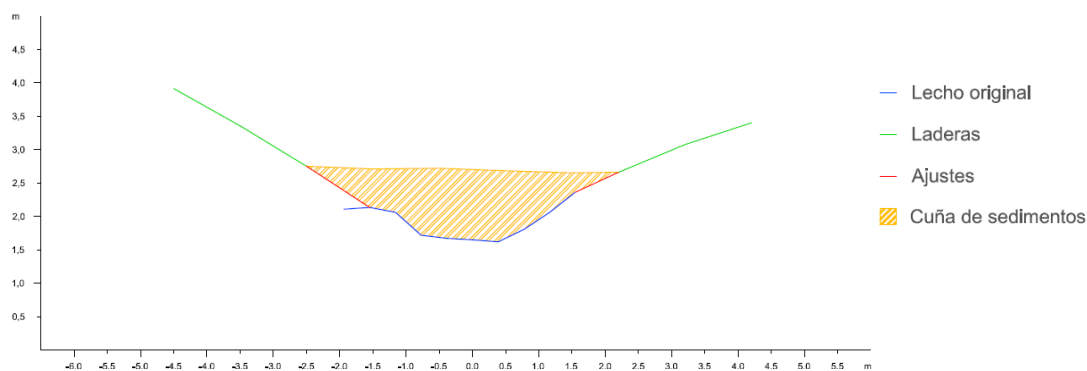


Figura A2.35. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5

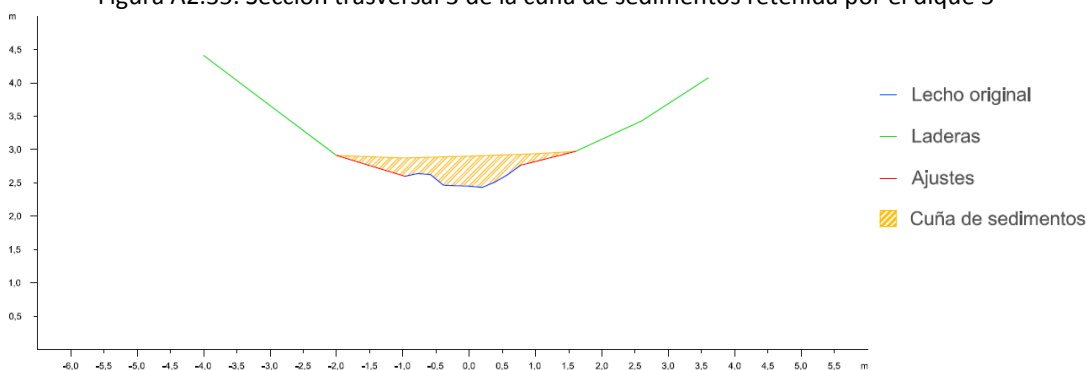


Figura A2.36. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 5

Dique 6

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 6 (Tabla A2.6) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.37 a A2.40).

Tabla A2.6. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 6

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	7,5807	10,8461	1	14,4001	13,0616
2		3,2654		3		
2	2,0	3,2654	4,2233	2	5,0013	3,8316
3		0,9579		4		
3	2,0	0,9579	1,3629	3	1,0312	0,9720
4		0,4050		5		
4	0,4	0,4050	0,0810	Opción 1	15,4313	14,0336
Fin cuña		0,0000		Opción 2	15,9284	14,7587
Volumen total			16,5133		15,6798	14,3962
Errores			A ₁ = 0,8334		A ₂ = -1,2837	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

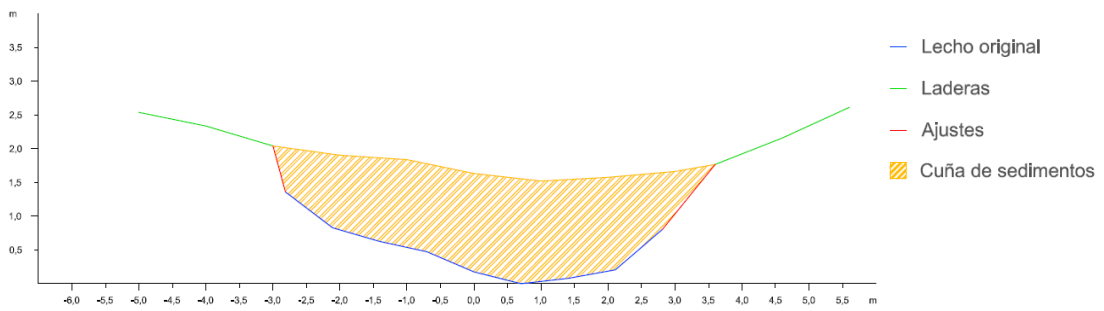


Figura A2.37. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6

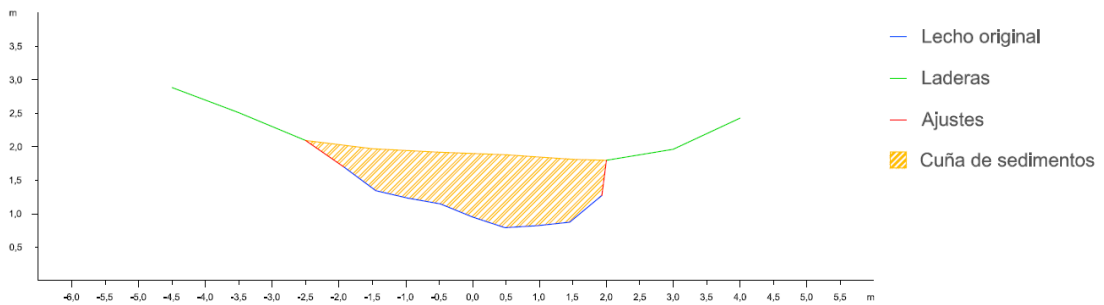


Figura A2.38. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6

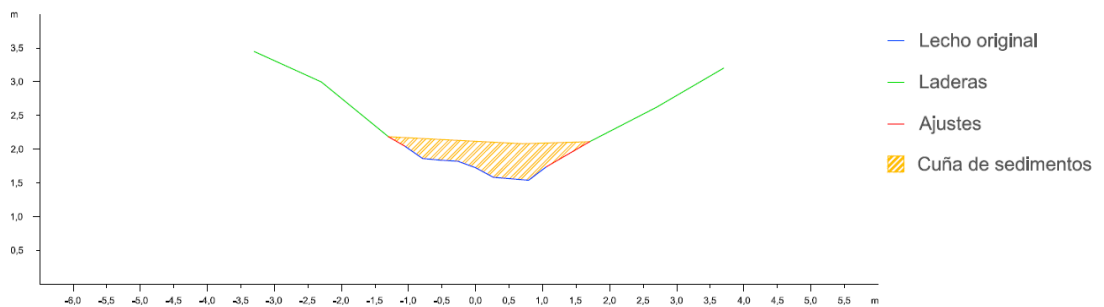


Figura A2.39. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6

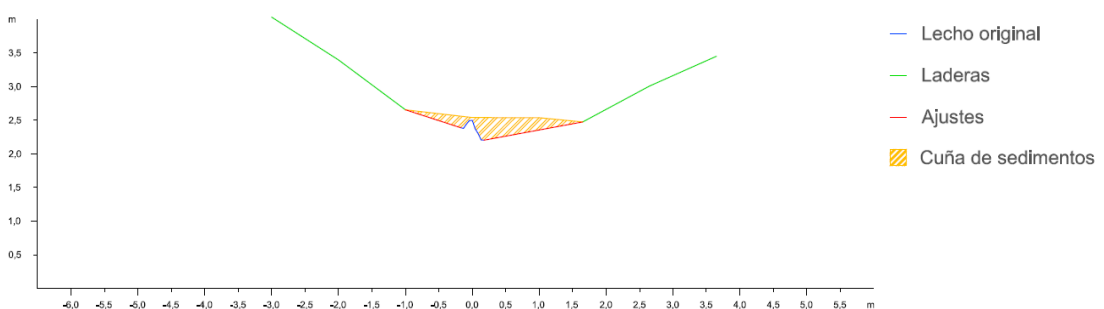


Figura A2.40. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 6

Dique 7

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 7 (Tabla A2.7) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña



de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.41 a A2.45).

Tabla A2.7. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 7

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	2,2873	1,8369	1	2,7935	2,7730
2		1,3865		3		
2	1,0	1,3865	0,9668	2	1,2406	1,0942
3		0,5471		4		
3	1,0	0,5471	0,3471	3	0,3967	0,2940
4		0,1470		5		
4	1,0	0,1470	0,1011	4	0,1225	0,1102
5		0,0551		Fin cuña		
5	1,0	0,0551	0,0276	Opción 1	3,2178	3,0946
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			3,2794		3,2089	3,0679
Errores			A ₁ = 0,0705		A ₂ = -0,1410	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

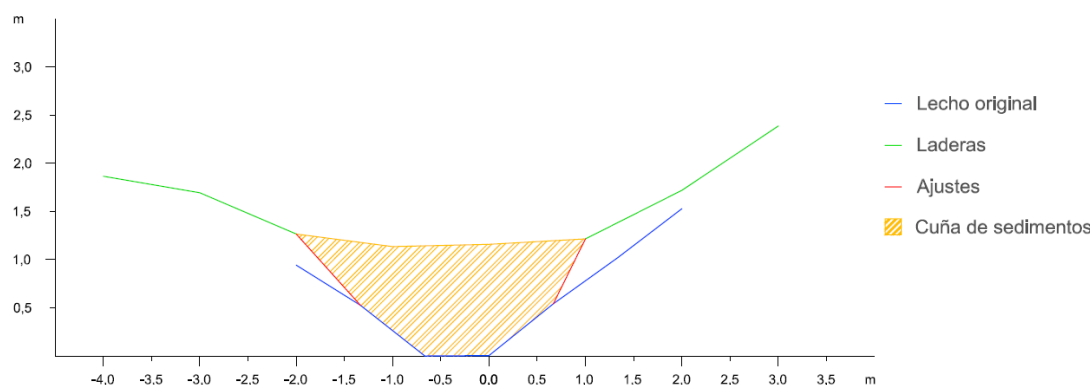


Figura A2.41. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7

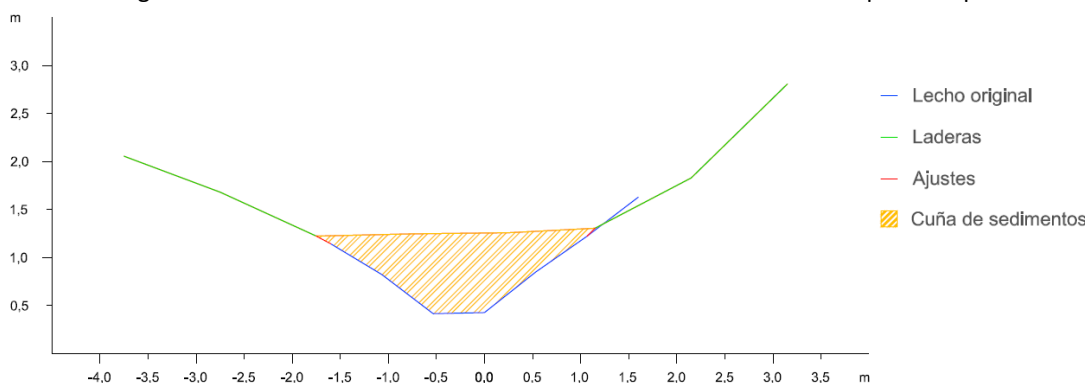


Figura A2.42. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7

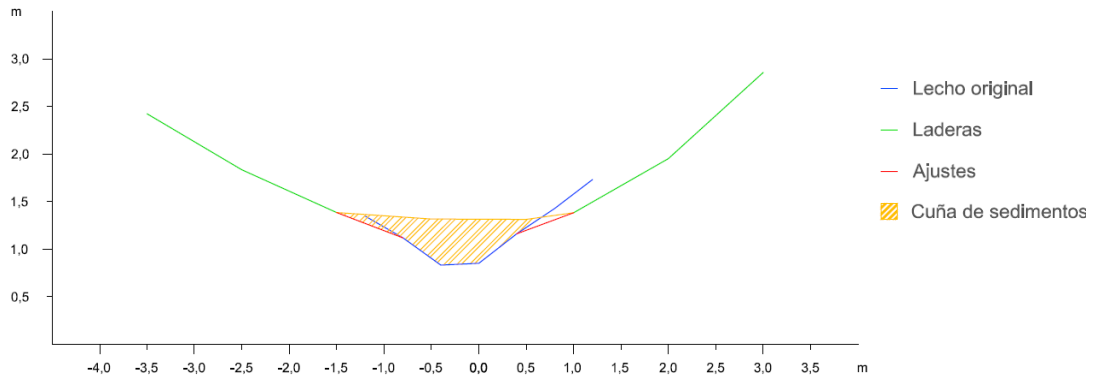


Figura A2.43. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7

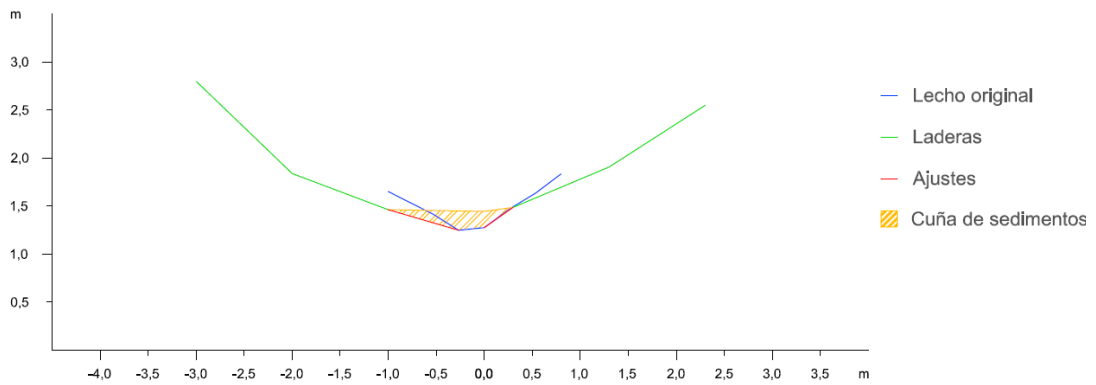


Figura A2.44. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7

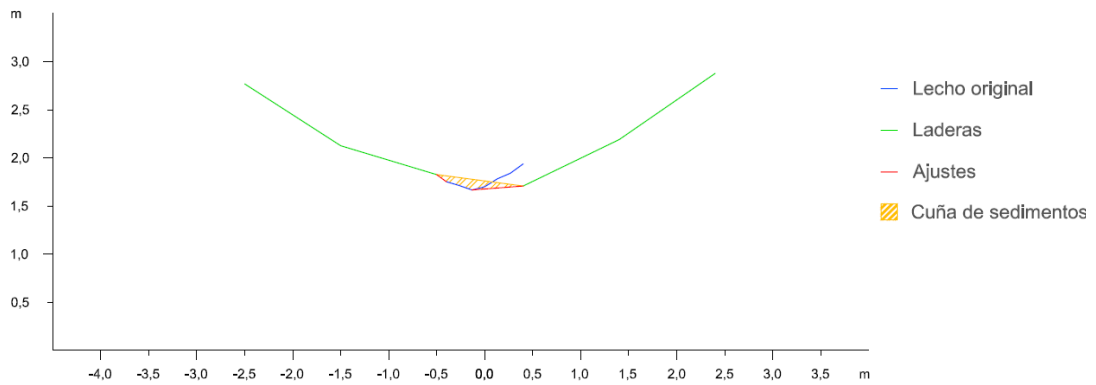


Figura A2.45. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 7

Dique 8

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 8 (Tabla A2.8) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.46 a A2.50).



Tabla A2.8. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 8

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	0,9491	1,2553	1	1,6438	1,2248
2		0,3062		3		
2	2,0	0,3062	0,5980	2	1,0656	1,1672
3		0,2918		4		
3	2,0	0,2918	0,4168	3	0,5279	0,5000
4		0,1250		5		
4	2,0	0,1250	0,1250	4	0,0729	0,0000
5		0,0000		Fin cuña		
5	1,5	0,0000	0,0000	Opción 1	2,1717	1,7248
Fin cuña		0,0000		Opción 2	2,3938	2,4225
Volumen total			2,3951		2,2827	2,0737
Errores			A ₁ = 0,1124		A ₂ = -0,2091	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

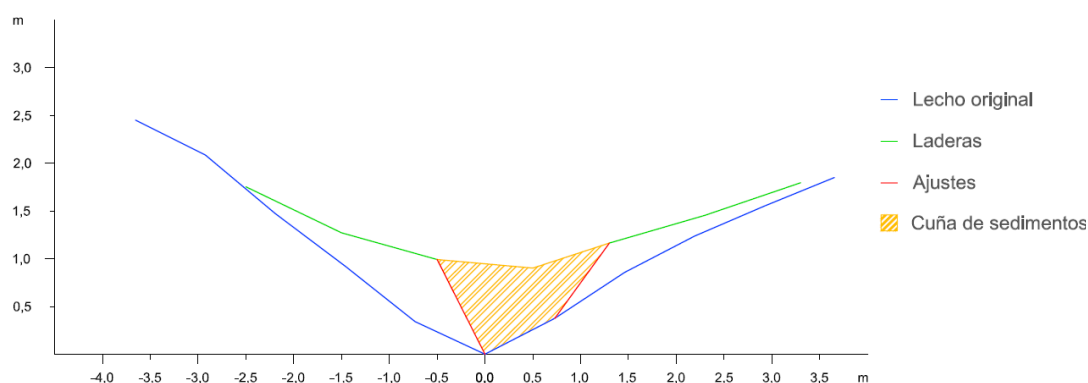


Figura A2.46. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8

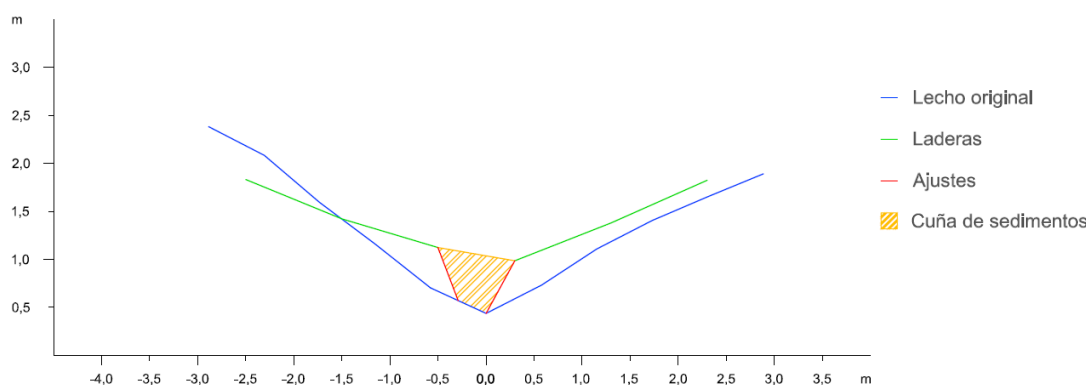


Figura A2.47. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8

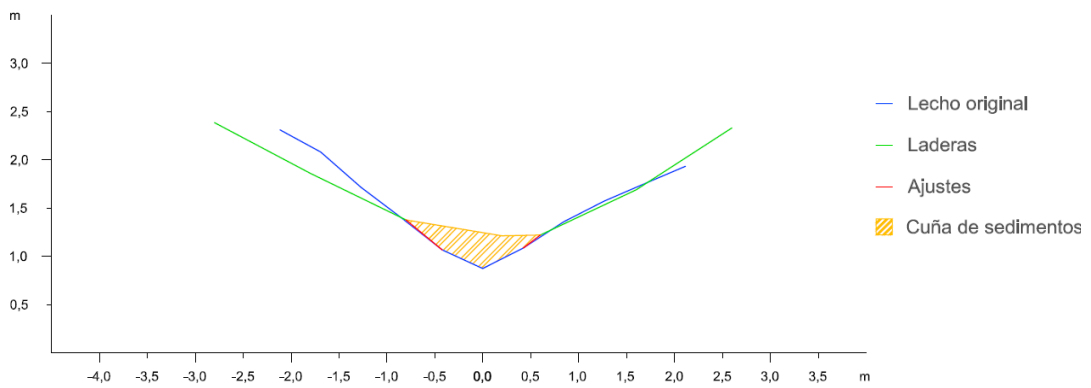


Figura A2.48. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8

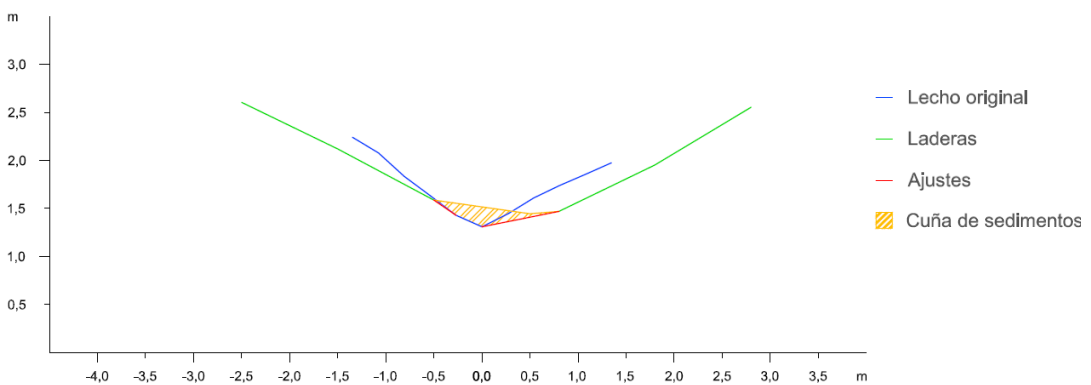


Figura A2.49. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8

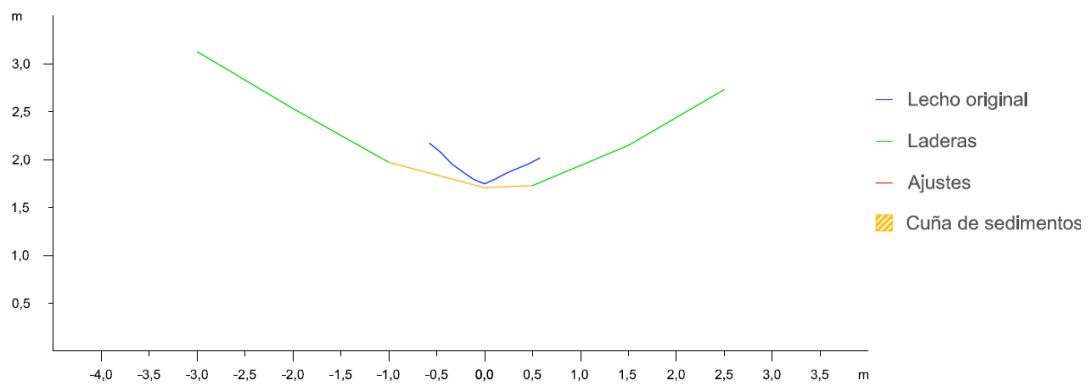


Figura A2.50. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 8

Dique 9

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 9 (Tabla A2.9) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.51 a A2.53).



Tabla A2.9. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 9

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	1,7974	2,3367	1	2,7505	2,1572
2		0,5393		3		
2	2,0	0,5393	0,7104	2	0,8158	0,6844
3		0,1711		Fin cuña		
3	2,0	0,1711	0,1711	Opción 1	2,9216	2,3283
Fin cuña		0,0000		Opción 2	3,1525	3,0211
Volumen total			3,2182		3,0370	2,6747
Errores			A ₁ = 0,1812		A ₂ = -0,3623	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

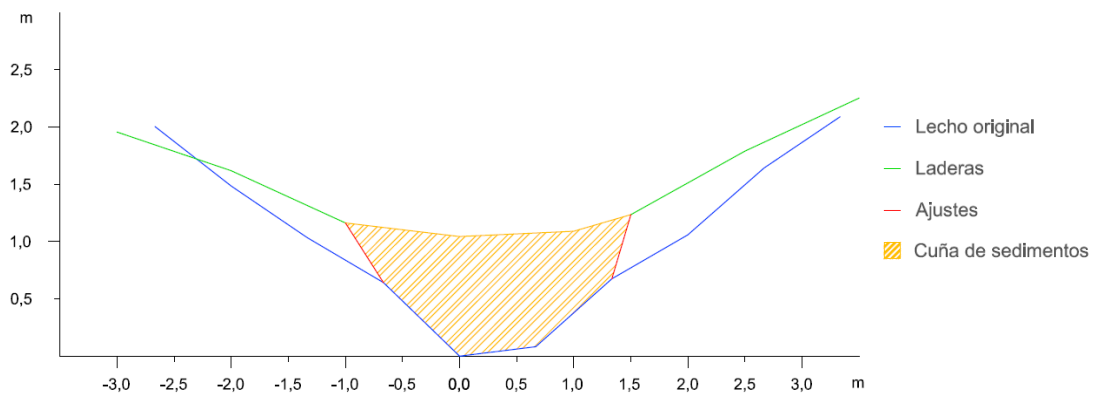


Figura A2.51. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 9

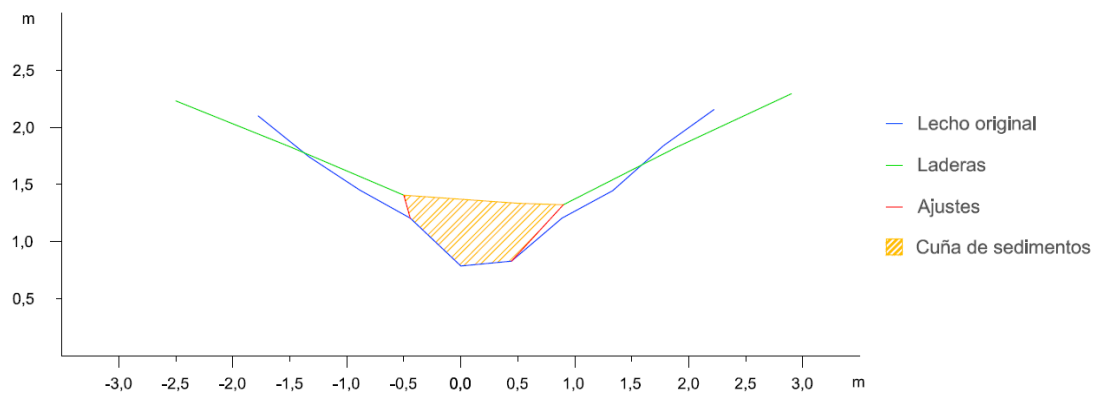


Figura A2.52. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 9

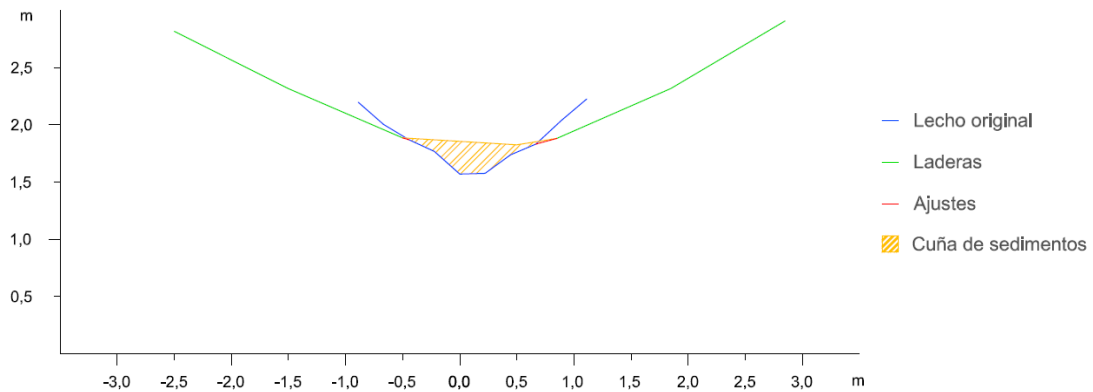


Figura A2.53. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 9

Dique 10

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 10 (Tabla A2.10) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.54 a A2.57).

Tabla A2.10. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 10

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	0,7693	0,9630	1	1,0549	0,7748
2		0,1937		3		
2	2,0	0,1937	0,2320	2	0,2543	0,1532
3		0,0383		4		
3	2,0	0,0383	0,0729	3	0,0618	0,0727
4		0,0346		5		
4	0,1	0,0346	0,0017	Opción 1	1,1168	0,8475
Fin cuña		0,0000		Opción 2	1,2191	1,1179
Volumen total			1,26963		1,1679	0,9827
Errores			A ₁ = 0,1017		A ₂ = -0,1852	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

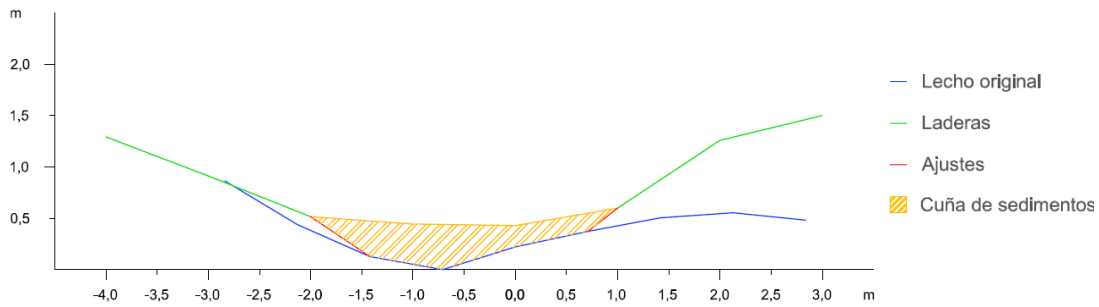


Figura A2.54. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10

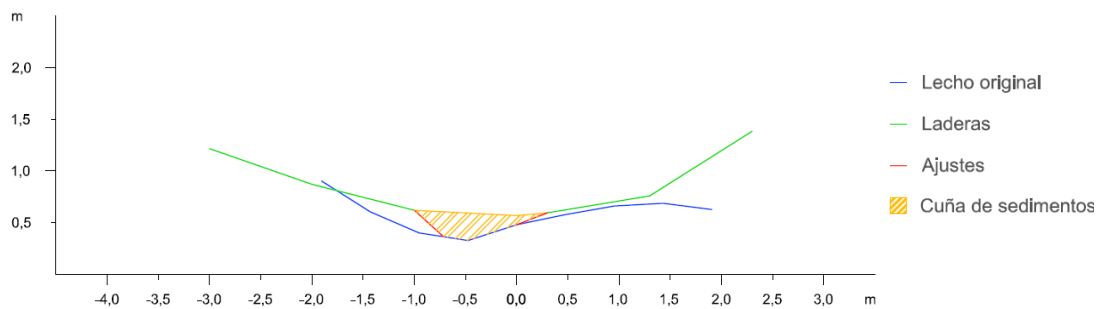


Figura A2.55. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10

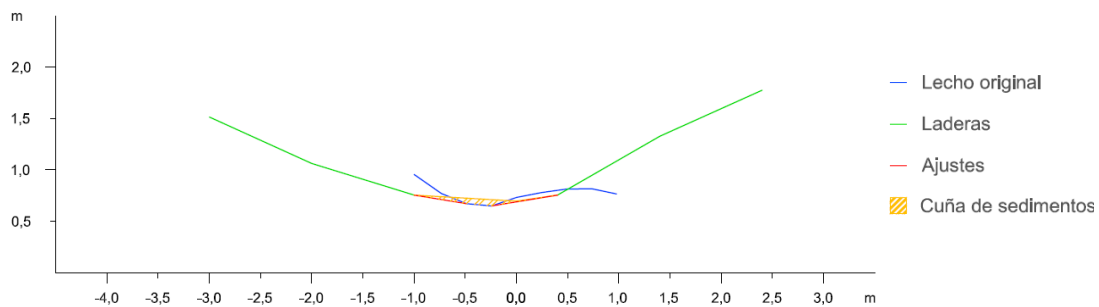


Figura A2.56. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10

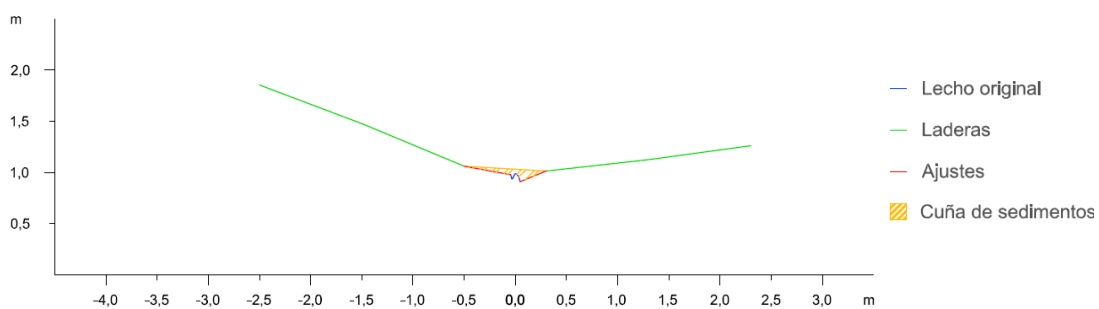


Figura A2.57. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 10

Dique 11

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 11 (Tabla A2.11) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.58 a A2.61).



Tabla A2.11. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 11

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	5,6158	6,8066	1	7,2759	4,7632
2		1,1908		3		
2	2,0	1,1908	1,7256	2	2,3033	2,1392
3		0,5348		4		
3	2,0	0,5348	0,6597	3	0,4224	0,3060
4		0,1249		Fin cuña		
4	0,45	0,1249	0,0281	Opción 1	7,6982	5,0692
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			9,2200		8,4181	7,0216
Errores			A ₁ = 0,8019		A ₂ = -1,3966	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

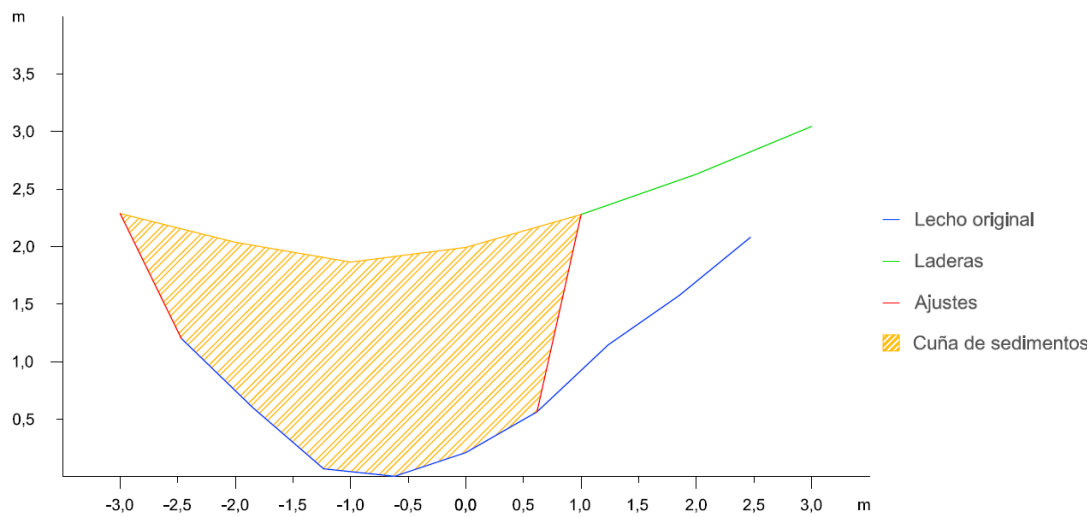


Figura A2.58. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11

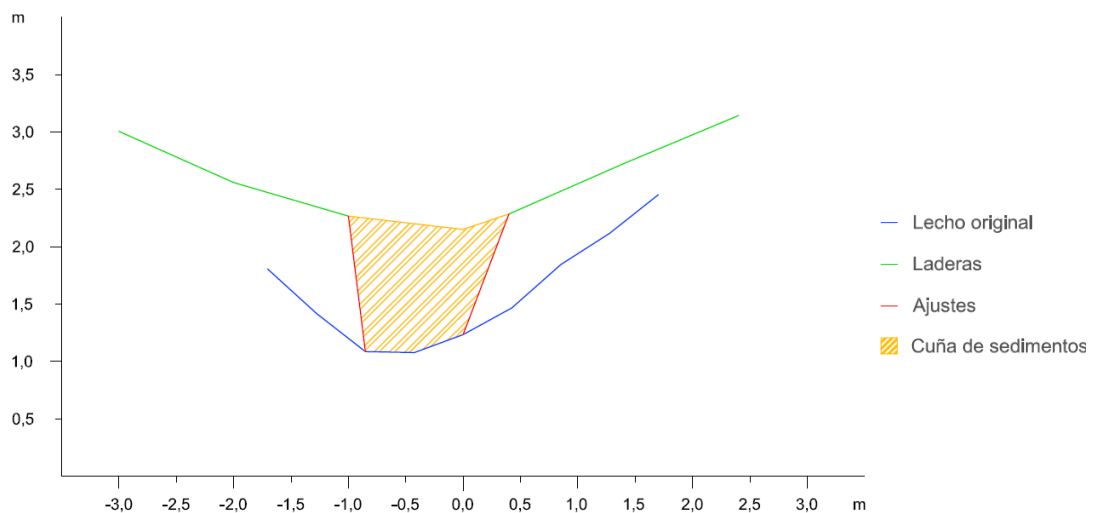


Figura A2.59. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11

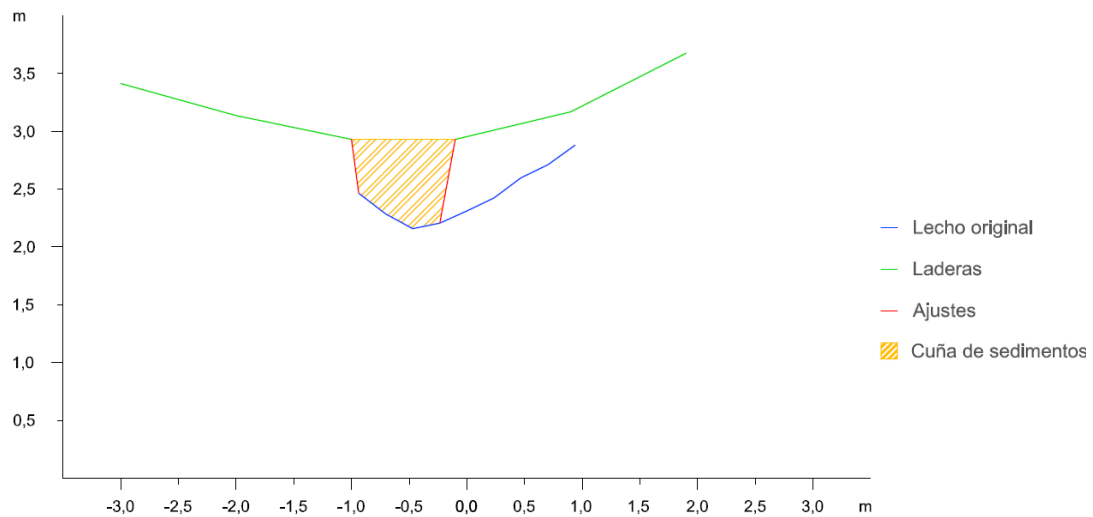


Figura A2.60. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11

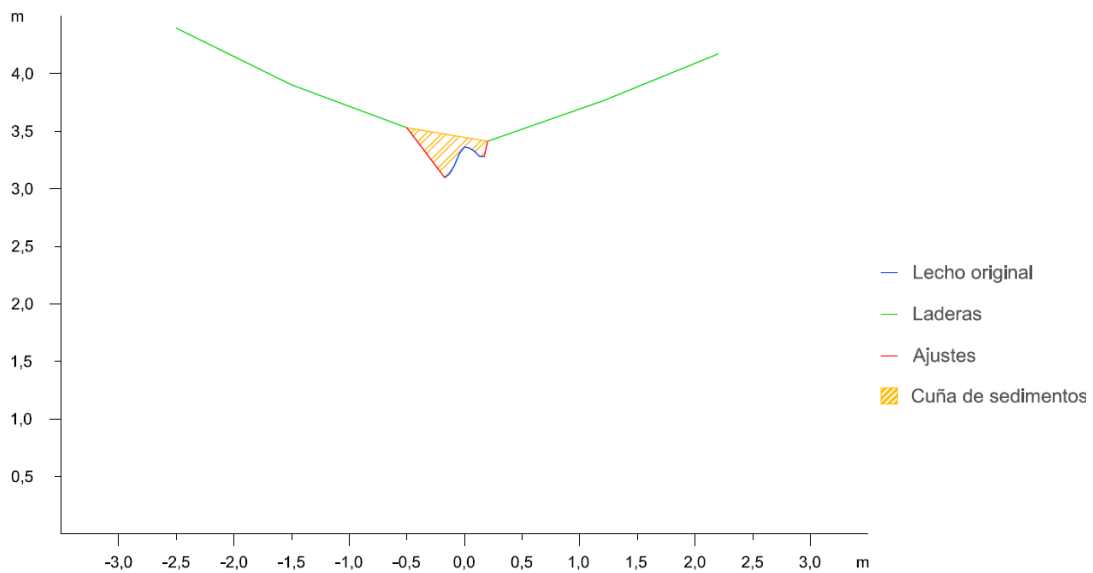


Figura A2.61. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 11

Dique 12

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 12 (Tabla A2.12) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.62 a A2.64).



Tabla A2.12. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 12

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,9429	1,3441	1	1,6903	1,4904
2		0,7452		3		
2	1,0	0,7452	0,4463	2	0,4448	0,2946
3		0,1473		Fin cuña		
3	1,0	0,1473	0,0737	Opción 1	1,7640	1,5641
Fin cuña		0,0000		Opción 2	1,7889	1,6387
Volumen total			1,86395		1,7764	1,6014
Errores			A ₁ = 0,0875		A ₂ = -0,1751	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

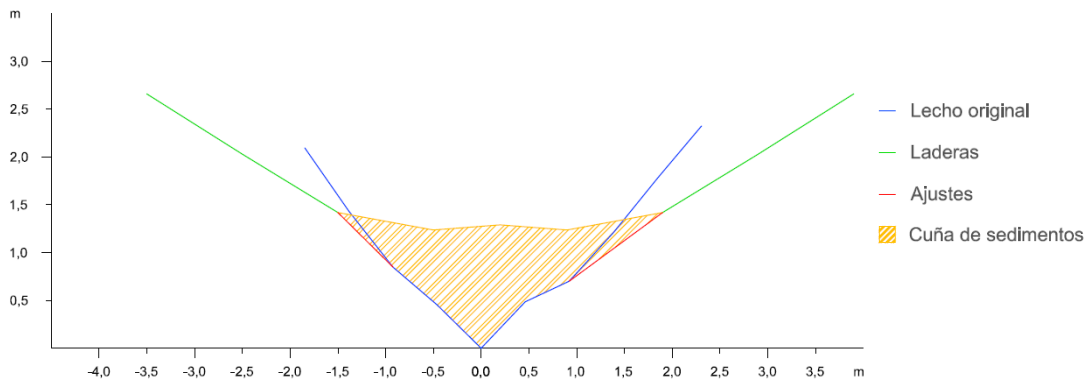


Figura A2.62. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 12

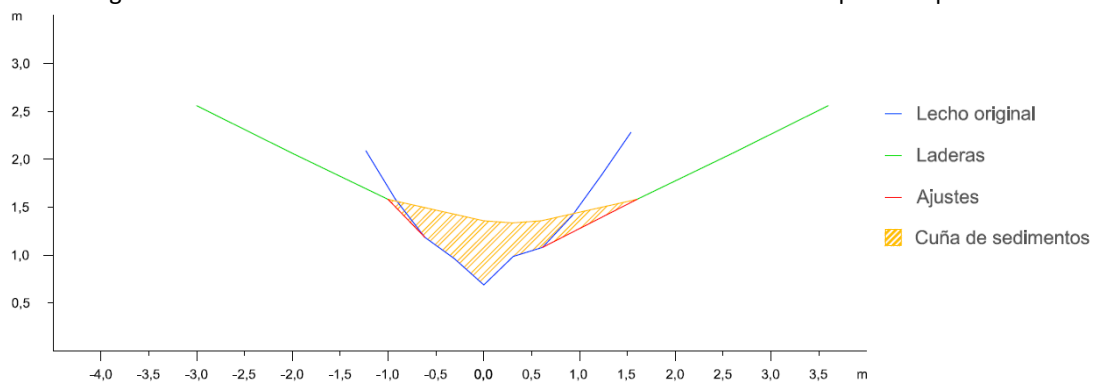


Figura A2.63. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 12

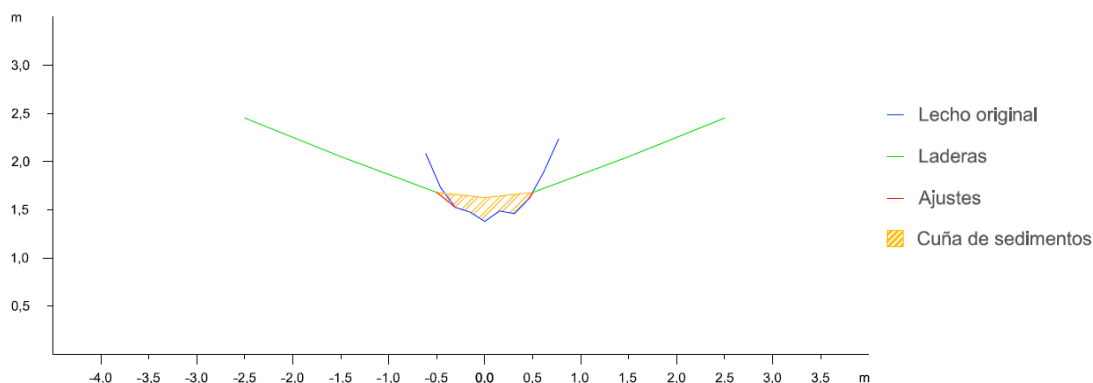


Figura A2.64. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 12

Dique 13

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 13 (Tabla A2.13) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.65 a A2.69).

Tabla A2.13. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 13

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	2,7464	5,2167	1	5,8334	4,3884
2		0,7314		3		
2	3,0	0,7314	1,3392	2	1,4161	0,9684
3		0,1614		4		
3	3,0	0,1614	0,3008	3	0,3178	0,2346
4		0,0391		5		
4	3,0	0,0391	0,0587	4	0,0241	0,0000
5		0,0000		Fin cuña		
5	0,7	0,0000	0,0000	Opción 1	6,1512	4,6230
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			6,9153		6,4041	5,4041
Errores			A ₁ = 0,5112		A ₂ = -1,0000	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

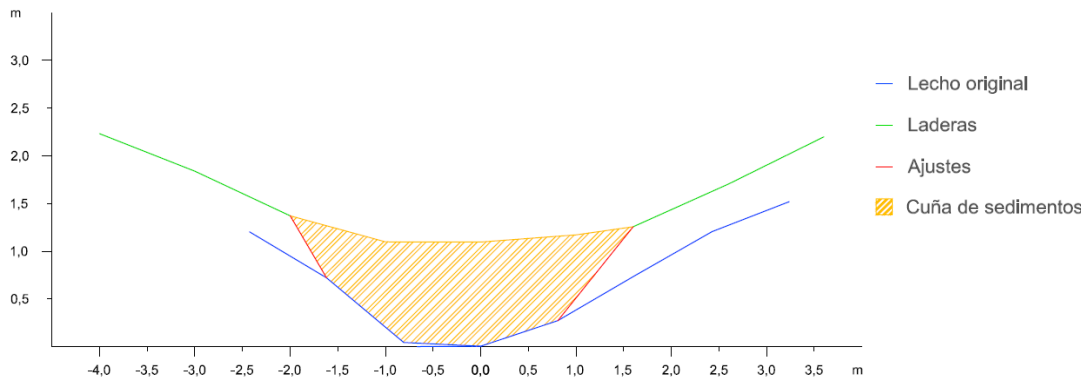


Figura A2.65. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13

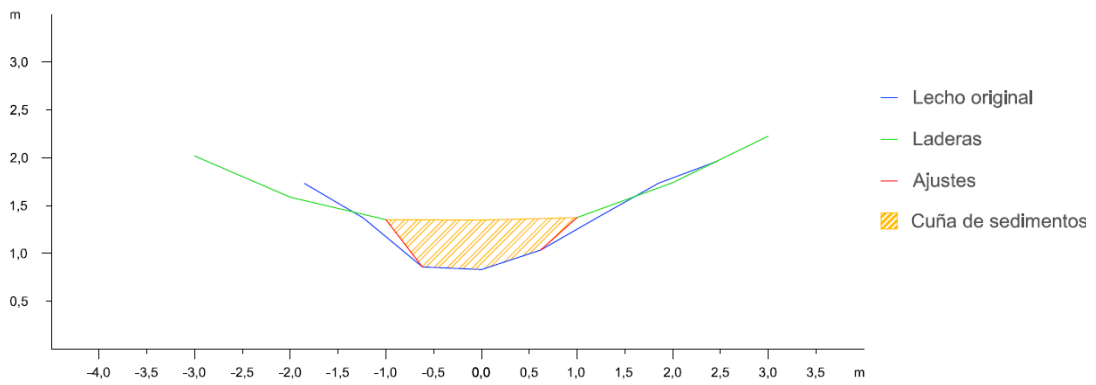


Figura A2.66. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13

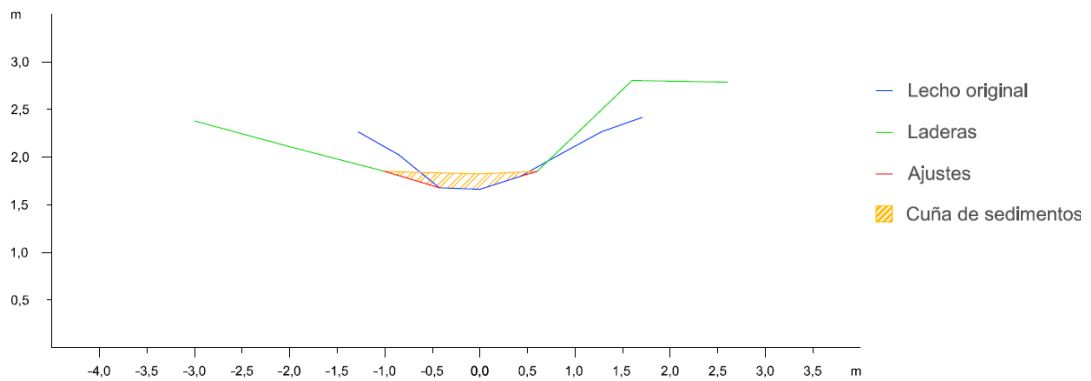


Figura A2.67. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13

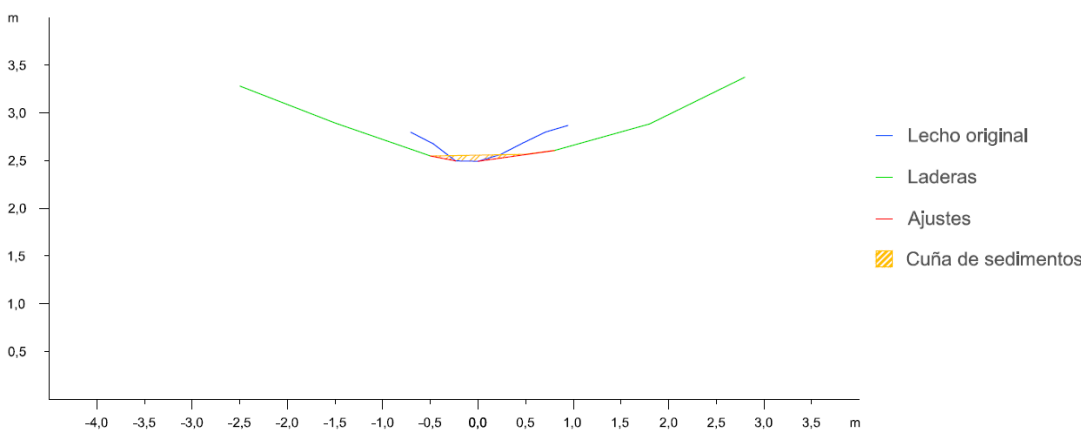


Figura A2.68. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13

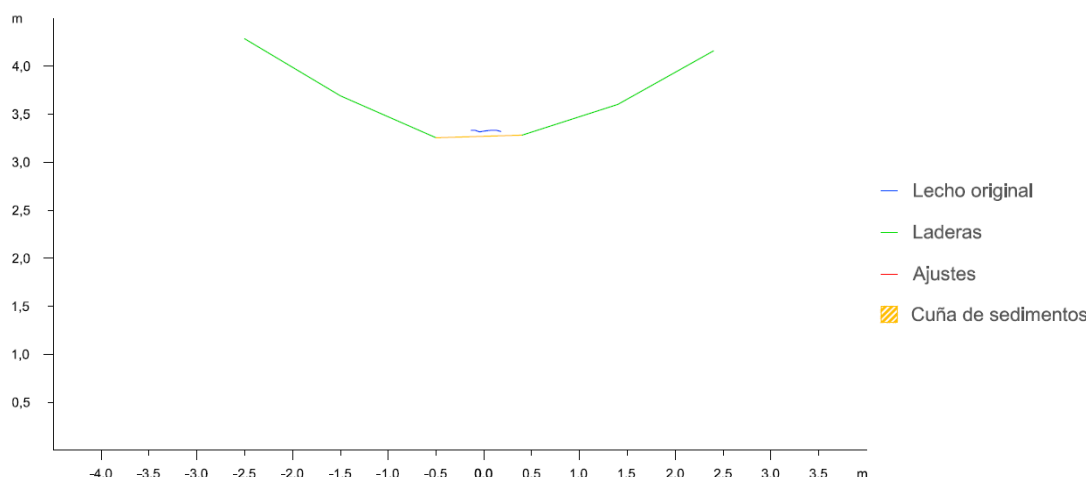


Figura A2.69. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 13

Dique 14

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 14 (Tabla A2.14) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.70 a A2.73).

Tabla A2.14. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 14

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	6,8239	19,2047	1	32,1664	35,8752
2		5,9792		3		
2	3,0	5,9792	11,1074	2	11,8861	8,5542
3		1,4257		4		
3	3,0	1,4257	2,4447	3	1,6068	0,8776
4		0,2041		Fin cuña		
4	1,30	0,2041	0,1327	Opción 1	33,7732	36,7528
Fin cuña		0,0000		Opción 2	31,2234	27,8915
Volumen total						32,4983
Errores			A ₁ = 0,3910	A ₂ = -0,1762		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

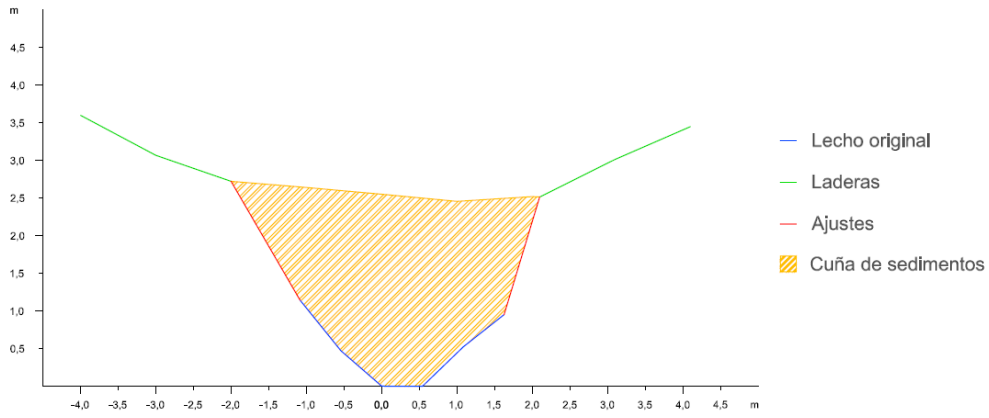


Figura A2.70. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 14

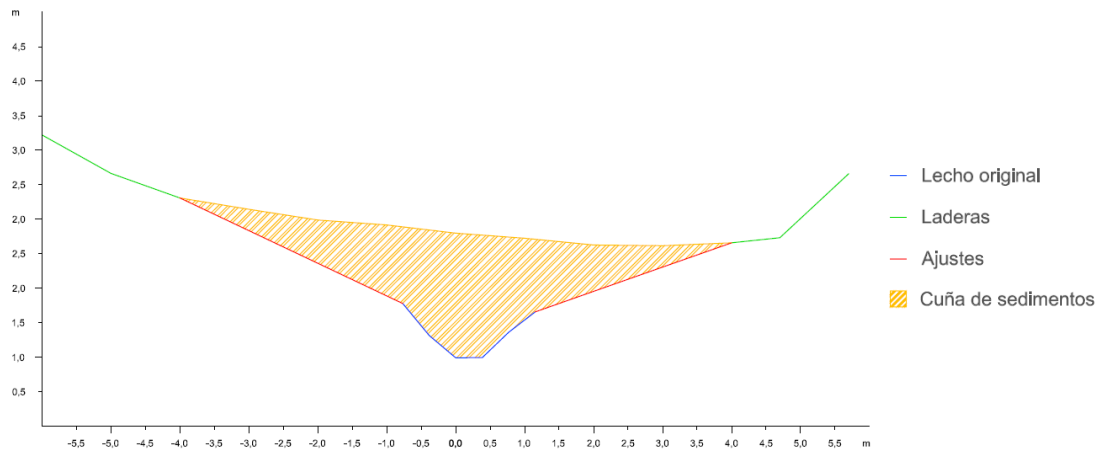


Figura A2.71. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 14

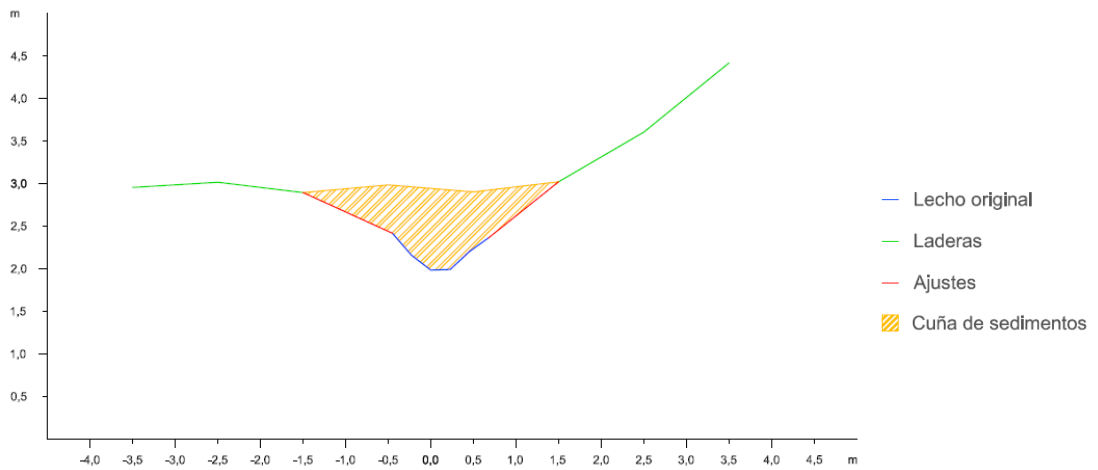


Figura A2.72. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 14

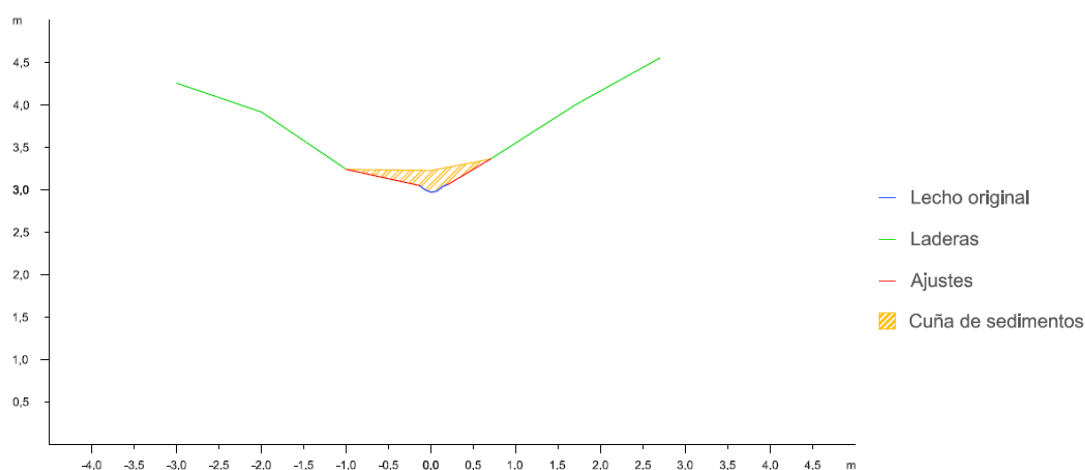


Figura A2.73. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 14

Dique 15

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 15 (Tabla A2.15) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.74 a A2.78).

Tabla A2.15. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 15

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	11,5099	18,1289	1	28,3195	26,4760
2		6,6190		3		
2	2,0	6,6190	11,1123	2	17,2614	17,9732
3		4,4933		4		
3	2,0	4,4933	5,7932	3	7,3801	5,1996
4		1,2999		5		
4	2,0	1,2999	2,6771	4	3,6313	4,4070
5		1,3772		Fin cuña		
5	1,2	1,3772	0,8263	Opción 1	36,5259	32,5019
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			38,5378		37,7737	36,5055
Errores			A ₁ = 0,7641		A ₂ = -1,2682	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

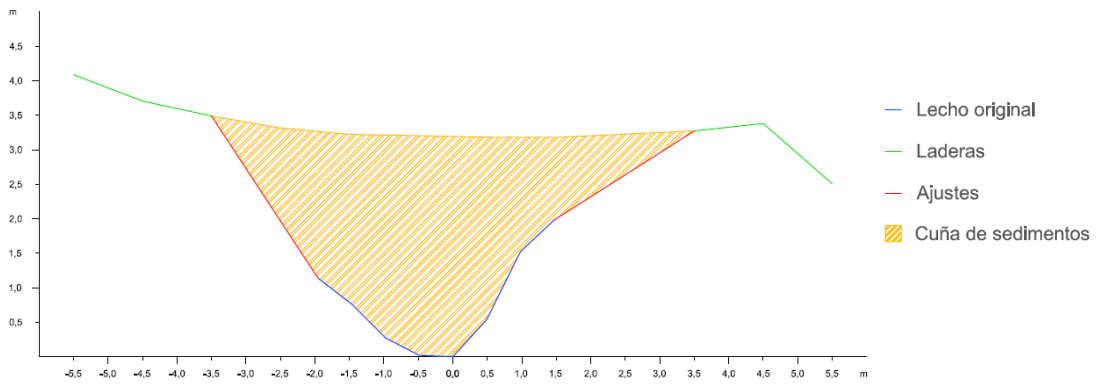


Figura A2.74. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 15

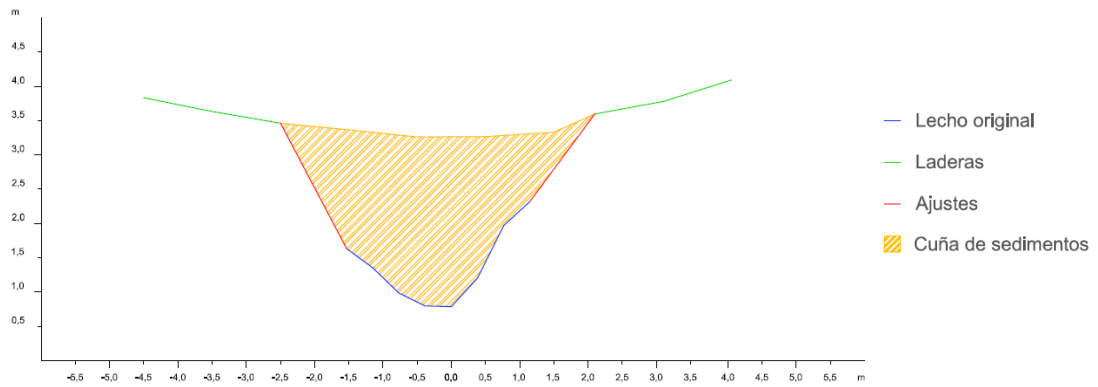


Figura A2.75. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 15

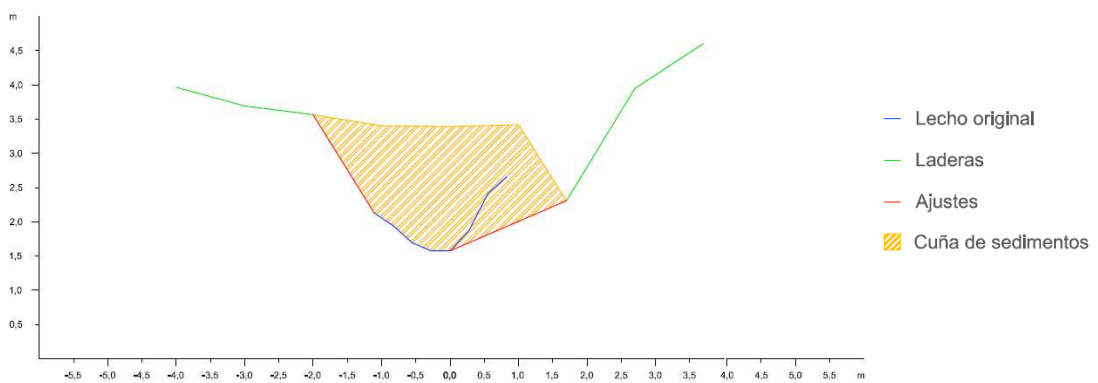


Figura A2.76. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 15

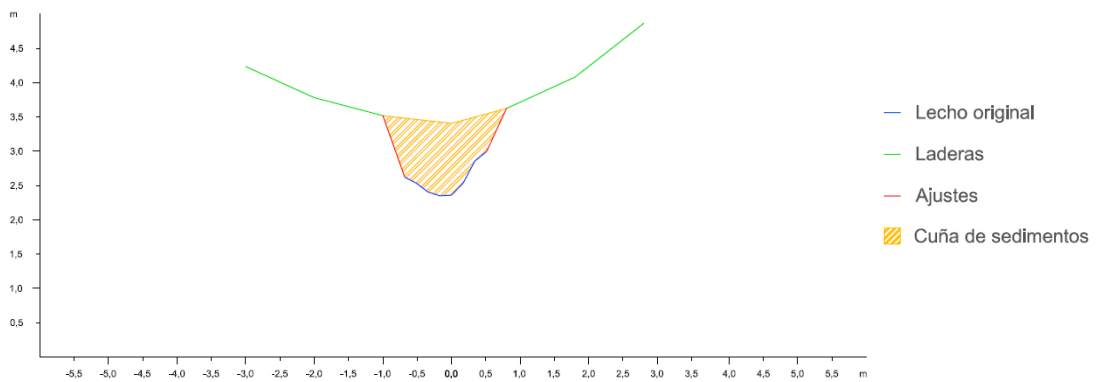


Figura A2.77. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 15

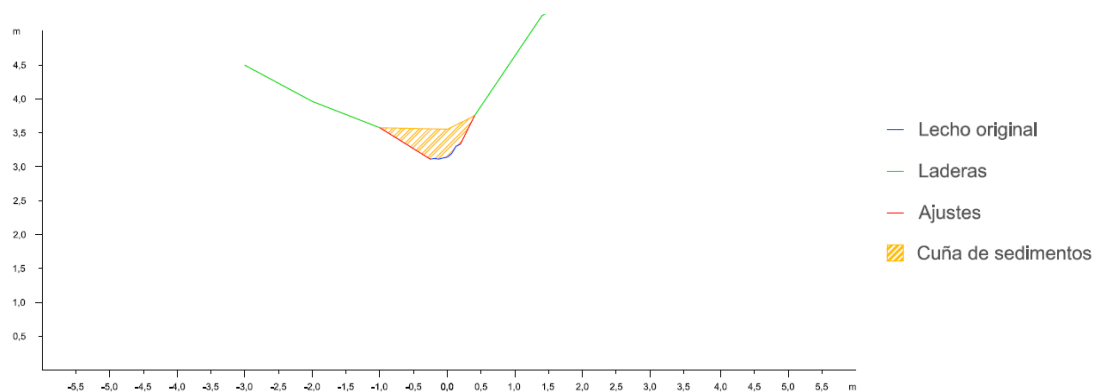


Figura A2.78. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 15

Dique 16

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 16 (Tabla A2.16) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.79 a A2.86).

Tabla A2.16. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,5	8,5530	11,0236	1	18,7594	18,4353
2		6,1451		3		
2	1,5	6,1451	7,8979	2	13,0409	13,1562
3		4,3854		4		
3	1,5	4,3854	5,0853	3	7,6703	7,1850
4		2,3950		5		
4	1,5	2,3950	2,8276	4	4,1559	4,1253
5		1,3751		6		
5	1,5	1,3751	1,3436	5	1,6230	1,2489
6		0,4163		7		
6	1,5	0,4163	0,4665	6	0,6612	0,6171
7		0,2057		8		
7	1,5	0,2057	0,2168	7	0,1886	0,1749
8		0,0833		Fin		
8	0,6	0,0833	0,0250	Opción 1	28,2413	27,0441
Fin cuña		0,0000		Opción 2	28,9065	28,9472
Volumen total			28,8861		28,5739	27,9956
Errores			A ₁ = 0,3123		A ₂ = -0,5782	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

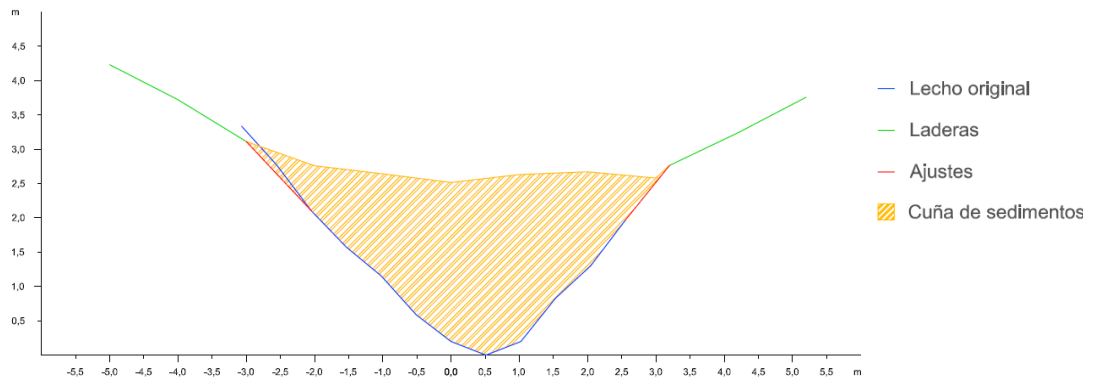


Figura A2.79. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

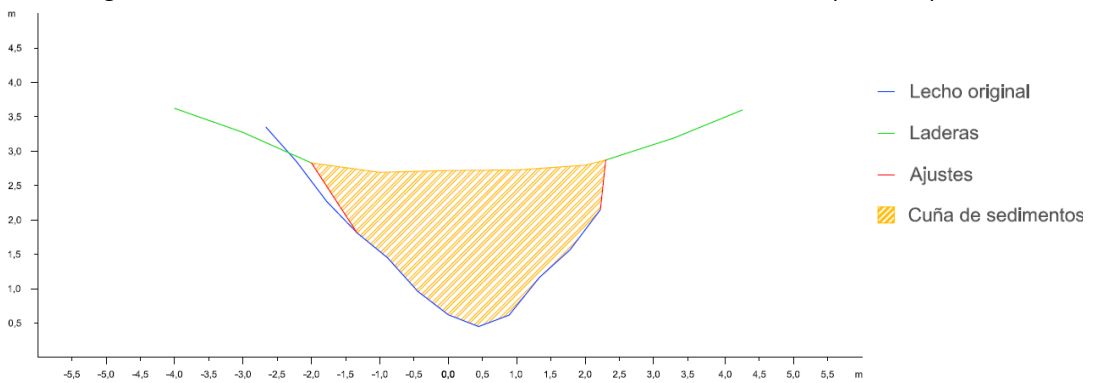


Figura A2.80. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

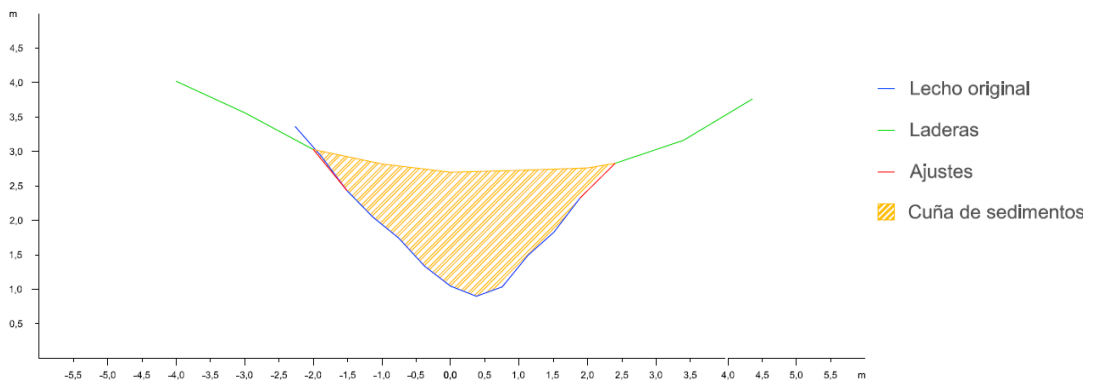


Figura A2.81. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

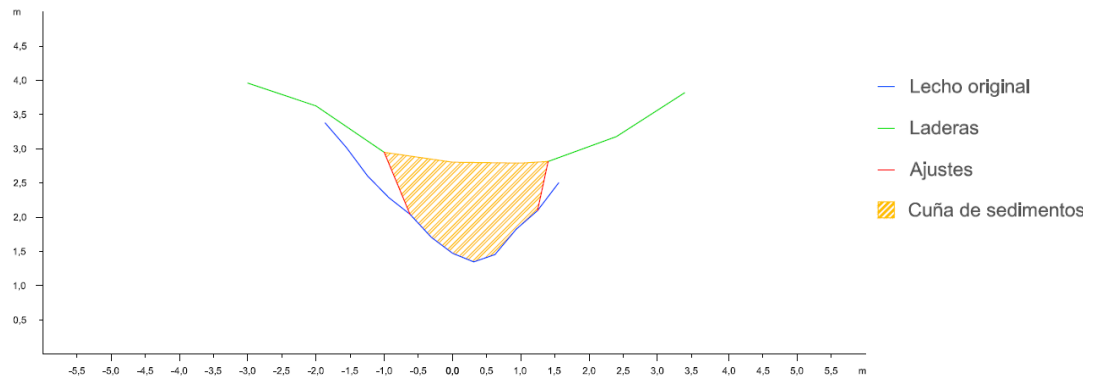


Figura A2.82. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

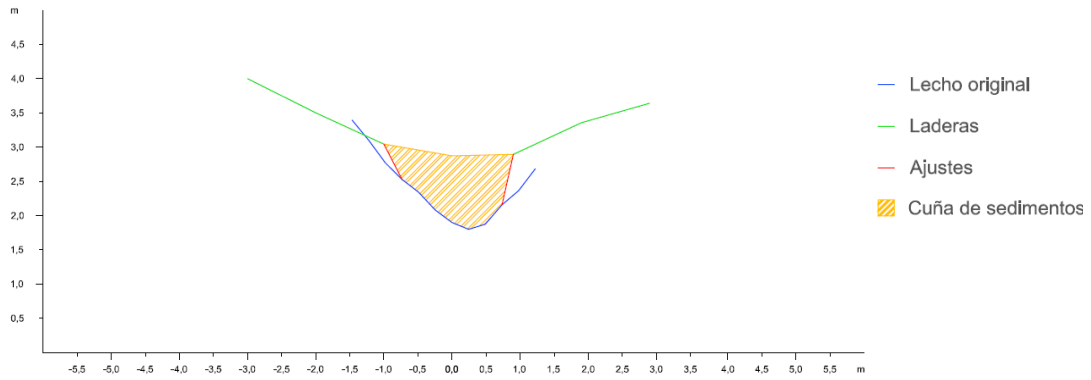


Figura A2.83. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

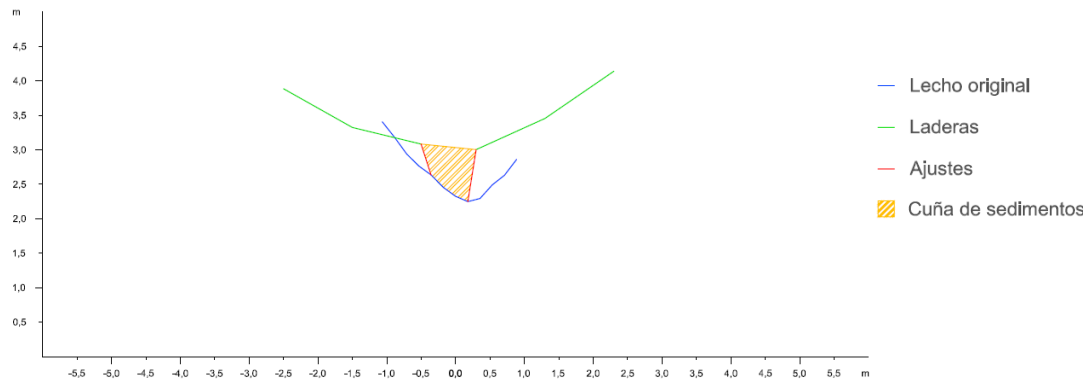


Figura A2.84. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

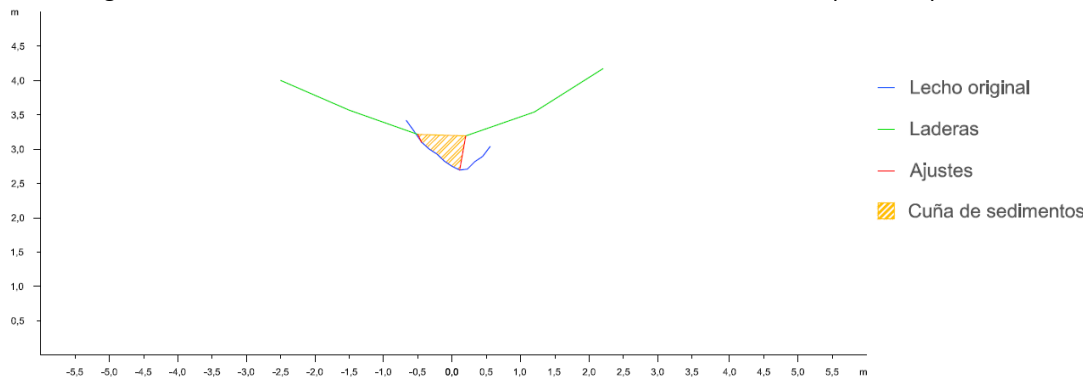


Figura A2.85. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

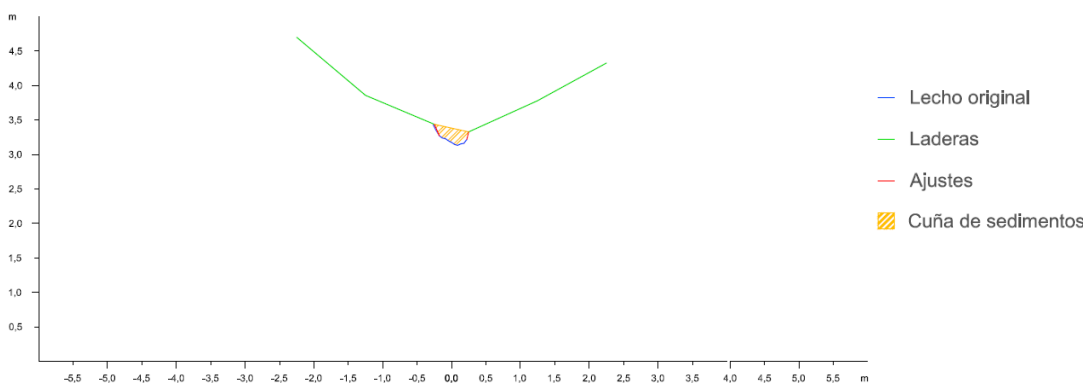


Figura A2.86. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 16

Dique 17

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 17 (Tabla A2.17) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.87 a A2.94).

Tabla A2.17. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,5	11,0809	14,1177	1	25,1950	23,2281
2		7,7427		3		
2	1,5	7,7427	12,0607	2	24,3090	25,0146
3		8,3382		4		
3	1,5	8,3382	11,8955	3	21,2567	22,5675
4		7,5225		5		
4	1,5	7,5225	8,7058	4	13,9624	12,2556
5		4,0852		6		
5	1,5	4,0852	6,1100	5	11,8516	12,1842
6		4,0614		7		
6	1,5	4,0614	5,5753	6	11,6087	10,1169
7		3,3723		8		
7	1,5	3,3723	6,7793	7	9,1138	11,9003
8		5,6668		Fin		
8	0,6	5,6668	1,7000	Opción 1	67,4170	69,8801
Fin cuña		0,0000		Opción 2	65,6978	63,2048
Volumen total			66,9443		66,5574	66,5425
Errores			A ₁ = 0,3869		A ₂ = -0,0149	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

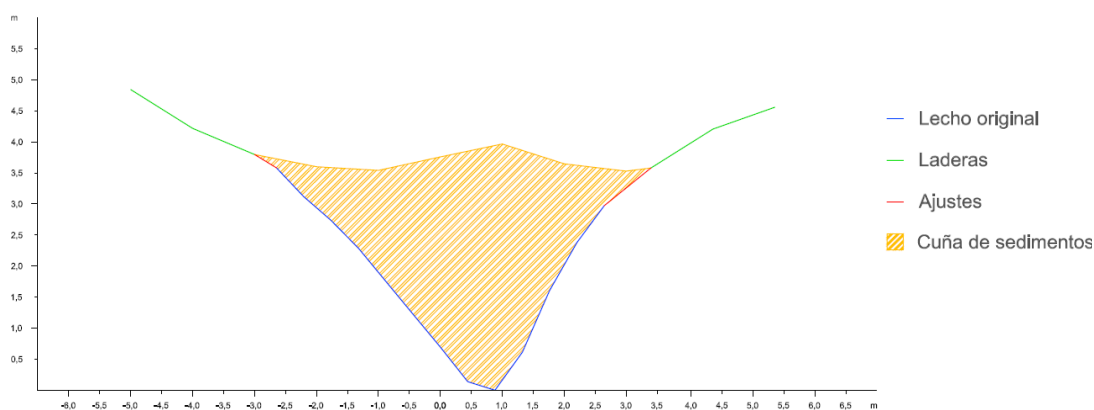


Figura A2.87. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

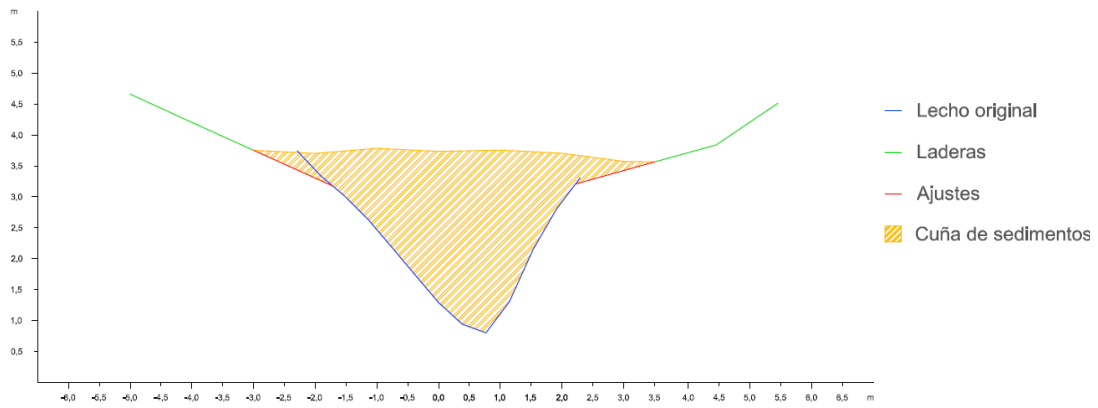


Figura A2.88. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

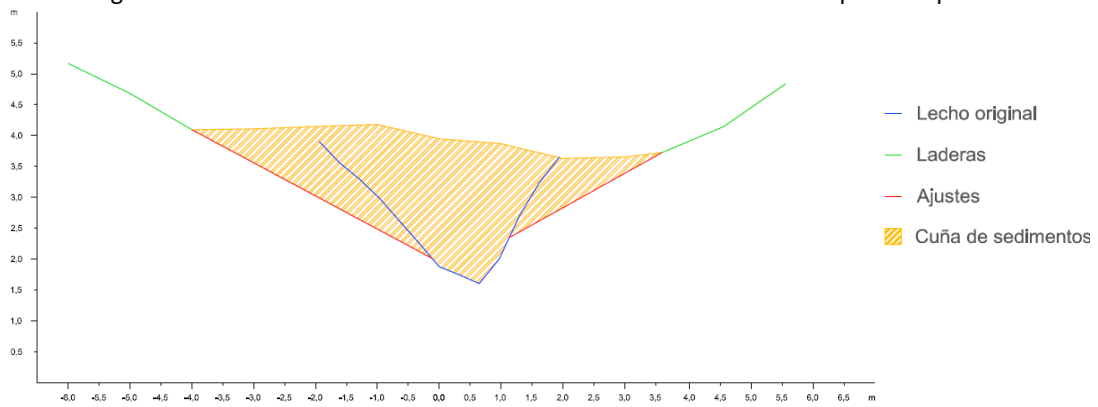


Figura A2.89. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

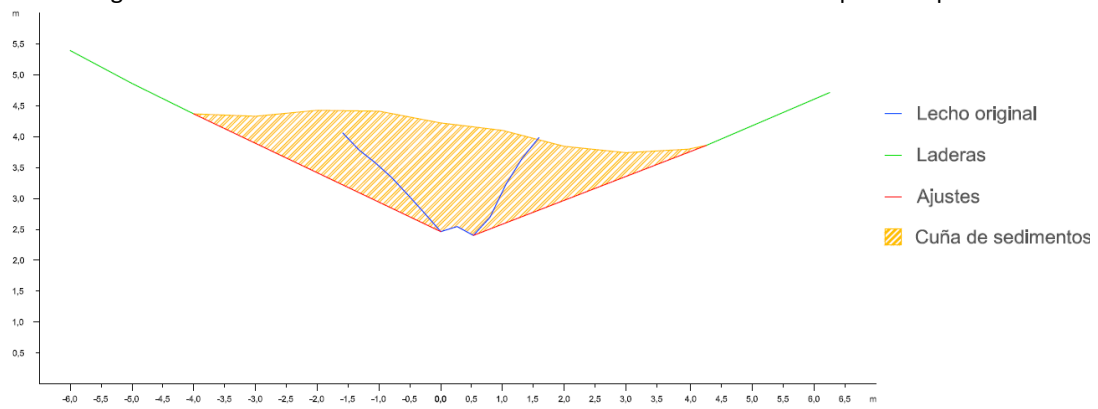


Figura A2.90. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

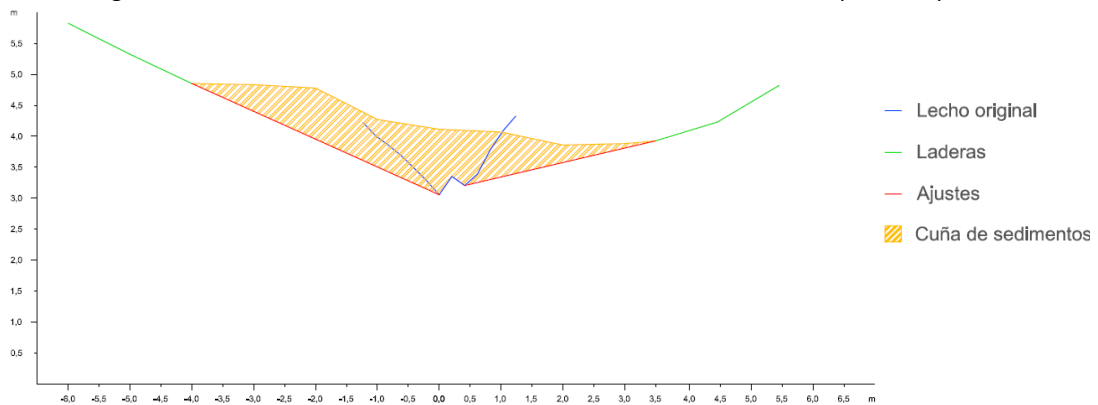


Figura A2.91. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

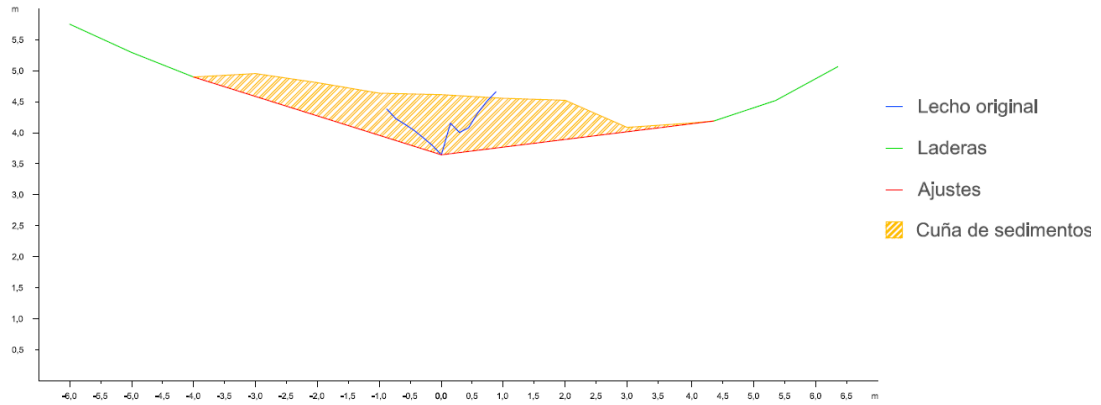


Figura A2.92. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

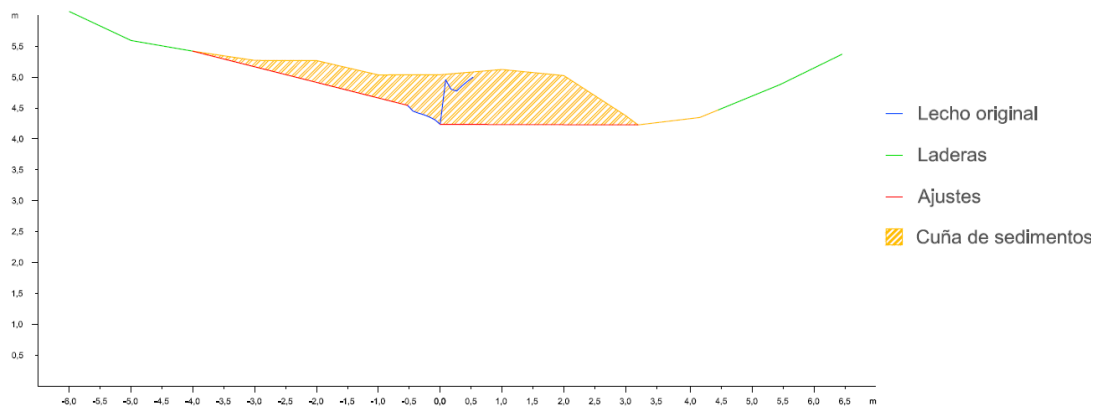


Figura A2.93. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

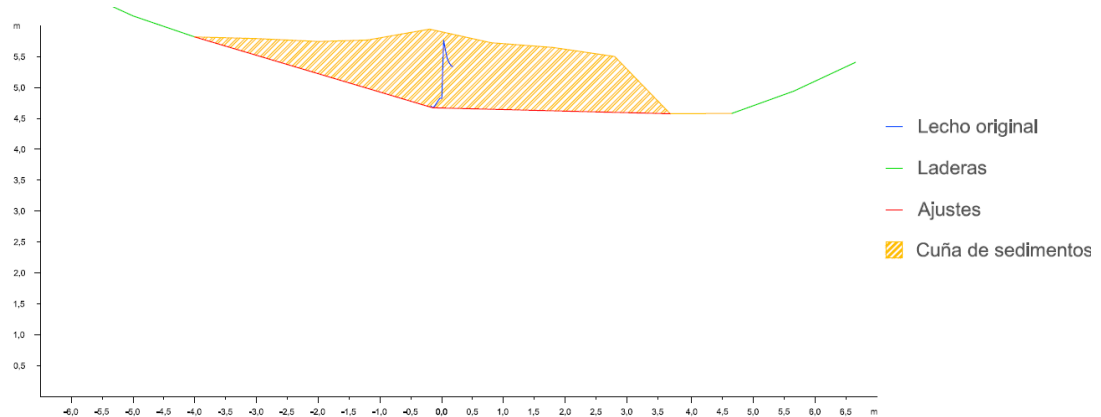


Figura A2.94. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 17

Dique 18

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 18 (Tabla A2.18) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.95 a A2.98).



Tabla A2.18. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 18

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	2,1339	3,2749	1	4,7835	4,5640
2		1,1410		3		
2	2,0	1,1410	1,6183	2	2,0481	1,9092
3		0,4773		4		
3	2,0	0,4773	0,4992	3	0,2165	0,0504
4		0,0219		5		
4	0,30	0,0219	0,0033	Opción 1	5,0000	4,6144
Fin cuña		0,0000		Opción 2	5,3263	5,1874
Volumen total			5,3957		5,1631	4,9009
Errores			A ₁ = 0,2326		A ₂ = -0,2623	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

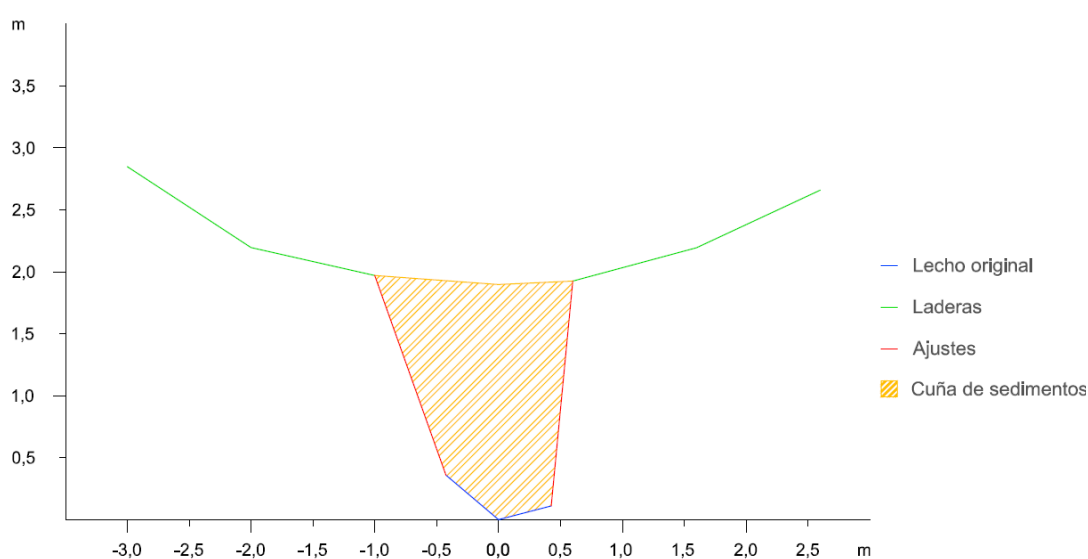


Figura A2.95. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 18

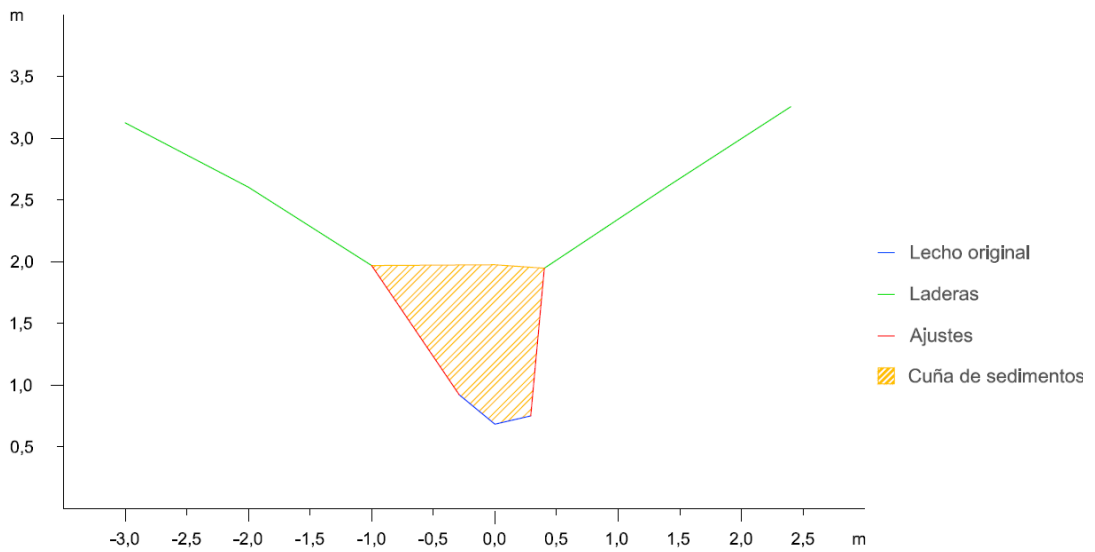


Figura A2.96. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 18

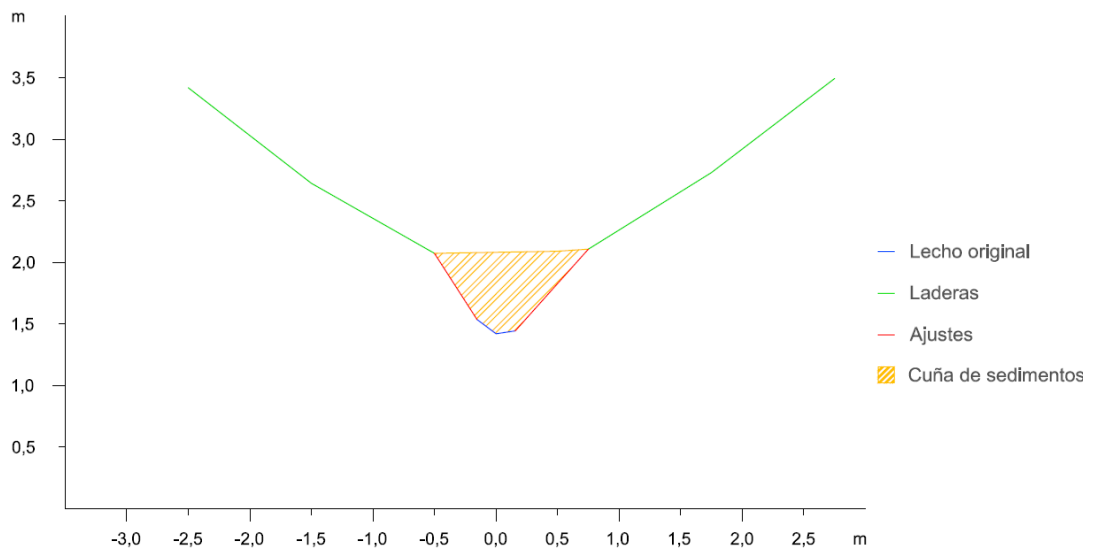


Figura A2.97. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 18

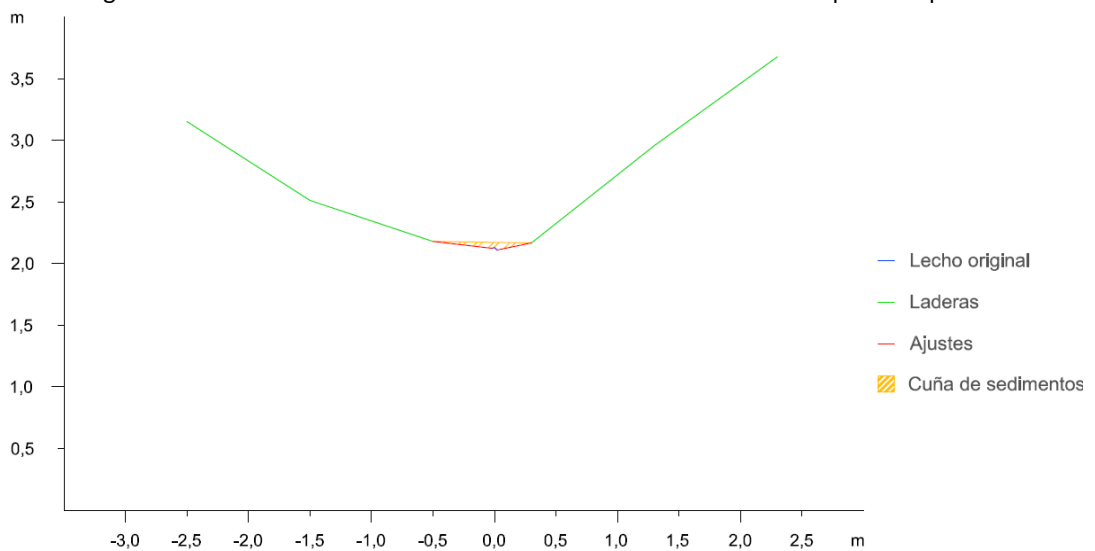


Figura A2.98. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 18

Dique 19

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 19 (Tabla A2.19) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.99 a A2.103).

Tabla A2.19. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 19

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	5,5959	12,6656	1	17,4574	17,0868
2		2,8478		3		
2	3,0	2,8478	4,9772	2	4,7726	2,8218
3		0,4703		4		
3	3,0	0,4703	0,7709	3	0,6536	0,2616
4		0,0436		5		
4	3,0	0,0436	0,0788	4	0,0462	0,0312
5		0,0089		Fin cuña		
5	0,5	0,0089	0,0022	Opción 1	18,1132	17,3506
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			18,4945		17,7988	16,4346
Errores				A ₁ = 0,6957		A ₂ = -1,3642

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

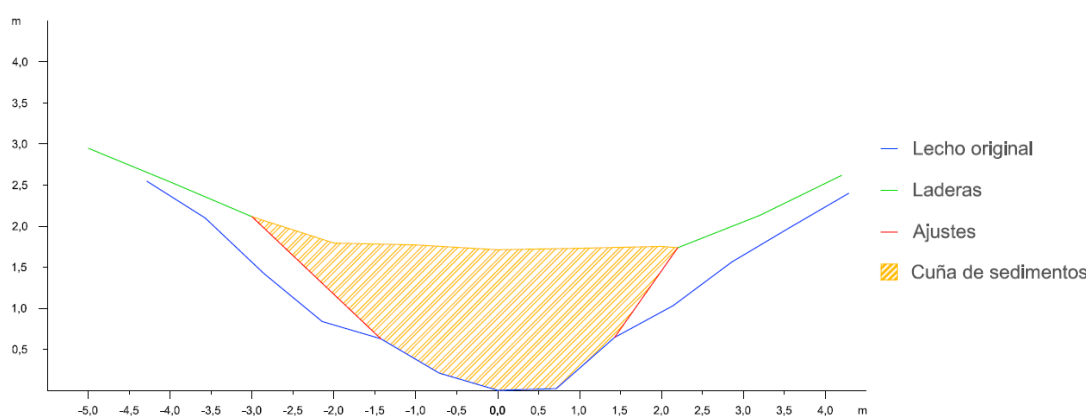


Figura A2.99. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 19

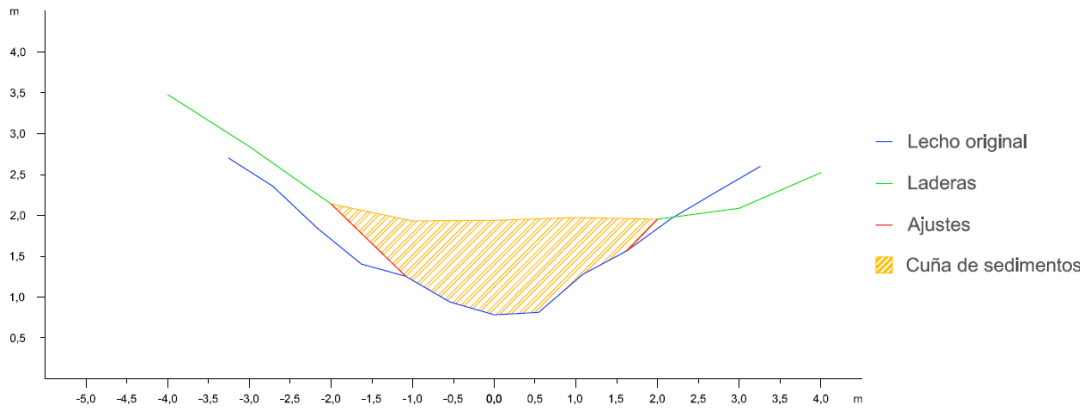


Figura A2.100. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 19

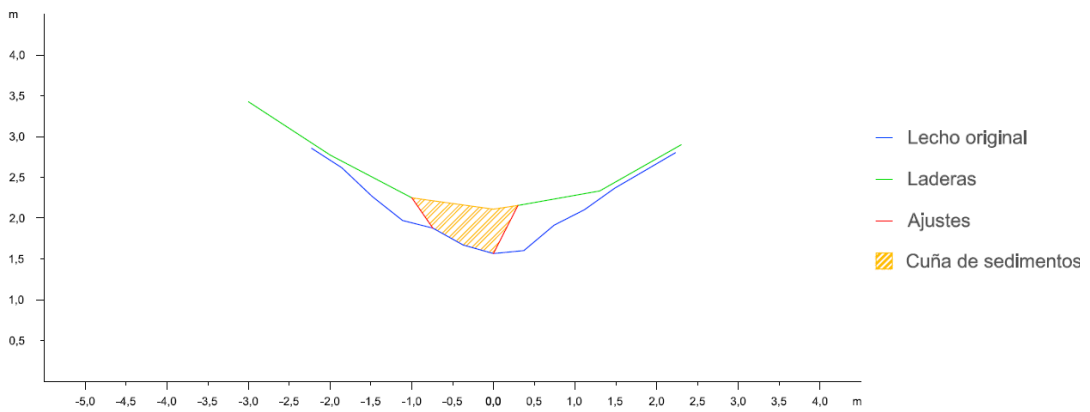


Figura A2.101. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 19

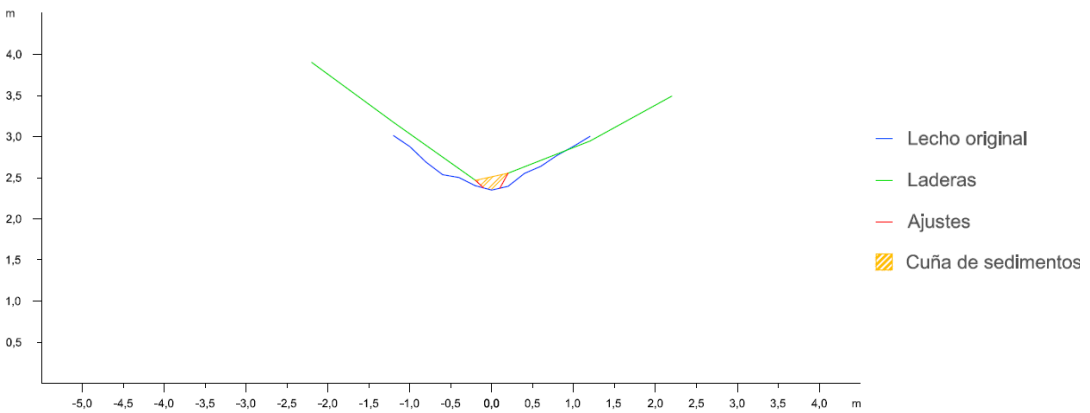


Figura A2.102. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 19

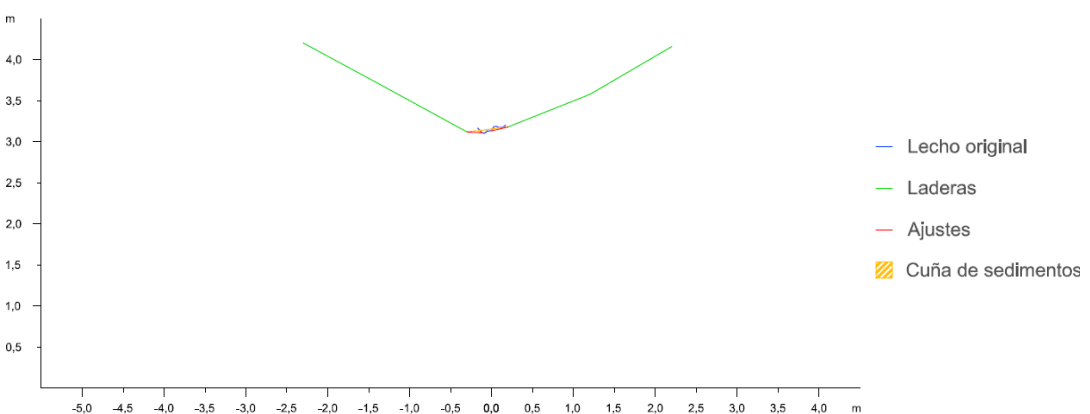


Figura A2.103. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 19



Dique 20

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 20 (Tabla A2.20) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.104 a A2.108).

Tabla A2.20. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 20

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,8141	5,8030	1	8,4049	7,9556
2		1,9889		3		
2	2,0	1,9889	2,8265	2	3,7083	3,3504
3		0,8376		4		
3	2,0	0,8376	1,0607	3	1,1633	0,8924
4		0,2231		5		
4	2,0	0,2231	0,2380	4	0,1885	0,0596
5		0,0149		Fin cuña		
5	2,0	0,0149	0,0149	Opción 1	9,5830	8,8629
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			9,9431		9,6414	9,0380
Errores			A₁= 0,3017		A₂= -0,6034	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

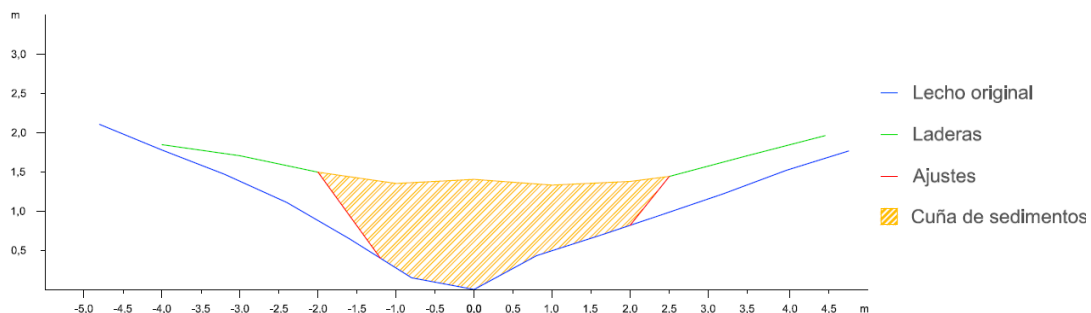


Figura A2.104. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 20

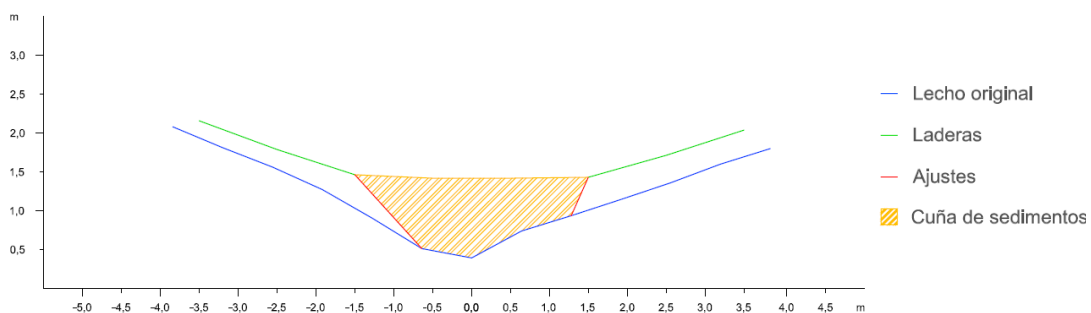


Figura A2.105. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 20

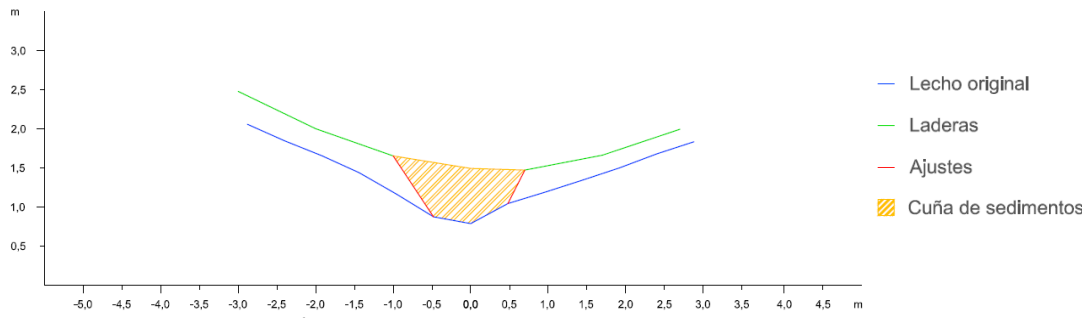


Figura A2.106. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 20

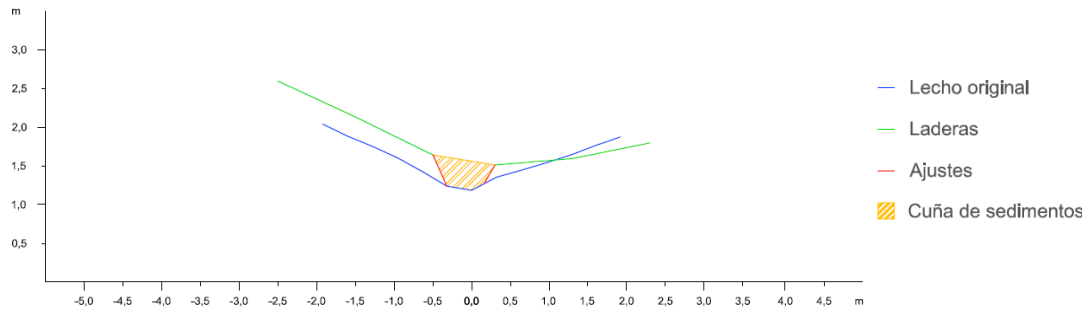


Figura A2.107. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 20

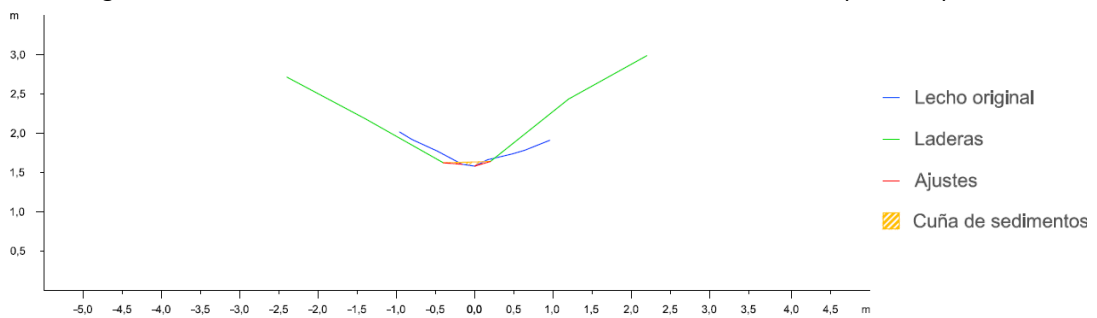


Figura A2.108. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 20

Dique 21

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 21 (Tabla A2.21) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.109 a A2.113).



Tabla A2.21. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 21

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	0,7635	1,4339	1	1,6104	1,1544
2		0,1924		3		
2	3,0	0,1924	0,4046	2	1,3016	0,4638
3		0,0773		4		
3	3,0	0,0773	1,3160	3	4,2773	4,8000
4		0,8000		5		
4	3,0	0,8000	2,7000	4	3,4400	4,3000
5		1,0000		Fin cuña		
5	1,3	1,0000	0,6500	Opción 1	6,5377	6,6044
Fin cuña		0,0000		Opción 2	6,1755	6,1977
Volumen total			6,5044		6,3566	6,4010
Errores			A₁= 0,1478		A₂= 0,0445	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

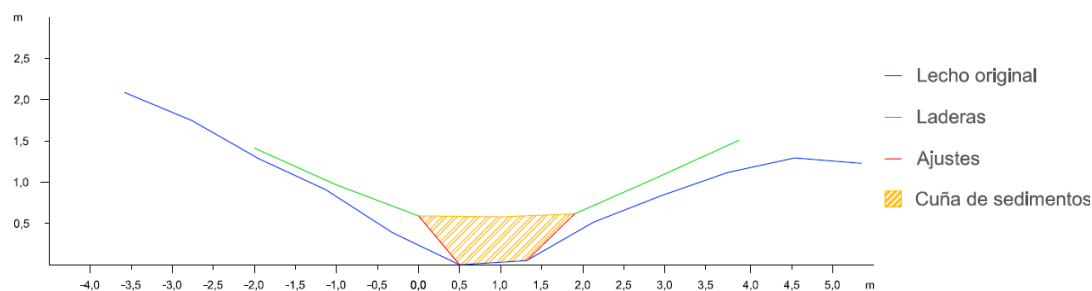


Figura A2.109. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 21

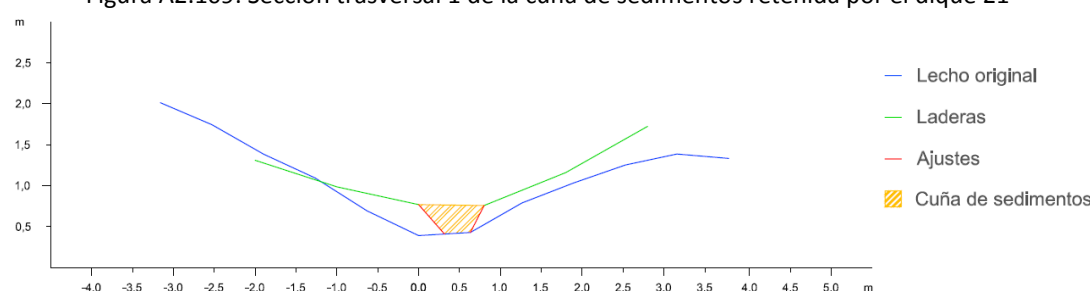


Figura A2.110. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 21

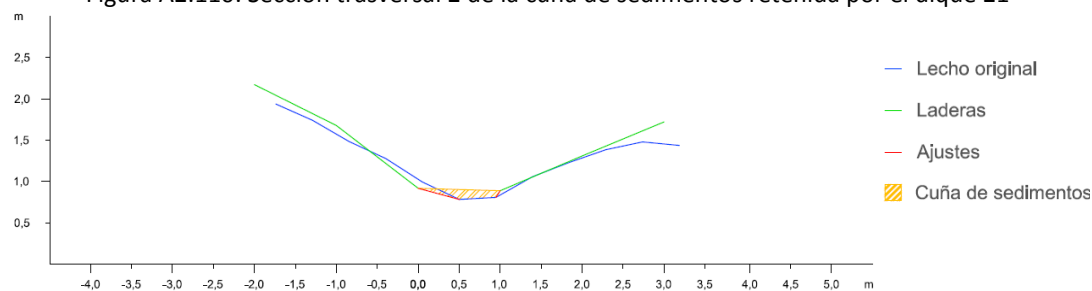


Figura A2.111. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 21

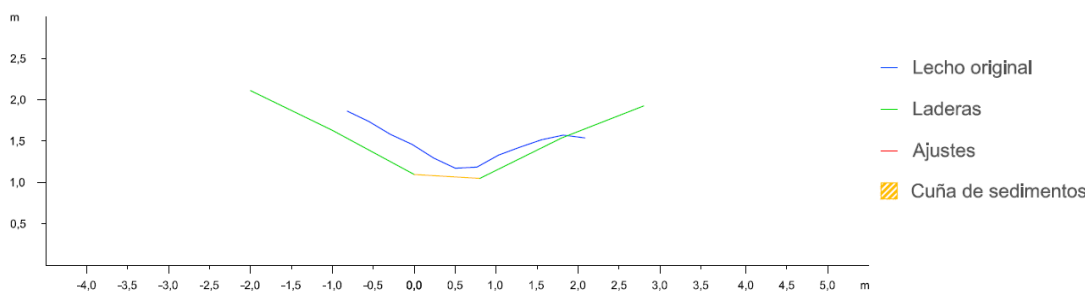


Figura A2.112. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 21

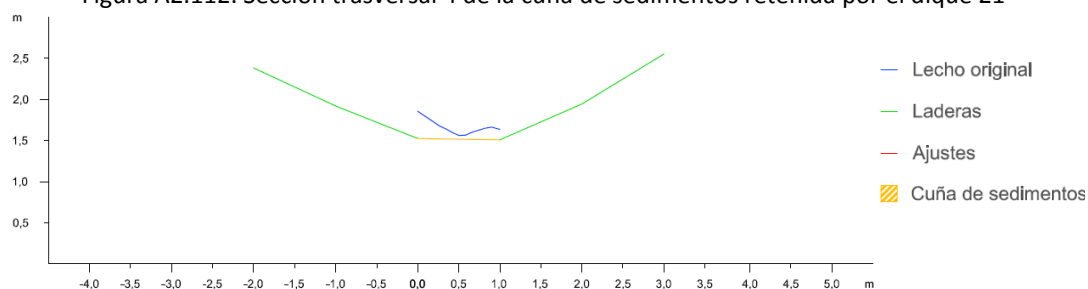


Figura A2.113. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 21

Dique 22

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 22 (Tabla A2.22) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.114 a A2.118).

Tabla A2.22. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 22

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		1,0747		1		
2	2,0	0,6344	1,7091	3	2,6639	2,5376
2		0,6344		2		
3	2,0	0,3836	1,0180	4	1,6254	1,5344
3		0,3836		3		
4	2,0	0,2693	0,6529	5	1,0344	1,0772
4		0,2693		4		
5	2,0	0,0908	0,3601	Fin cuña	0,3163	0,2724
5		0,0908		Opción 1	3,7437	3,6602
Fin cuña	1,0	0,0000	0,0454	Opción 2	3,6508	3,5159
Volumen total			3,7855		3,6972	3,5881
Errores			A ₁ = 0,0883		A ₂ = -0,1092	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

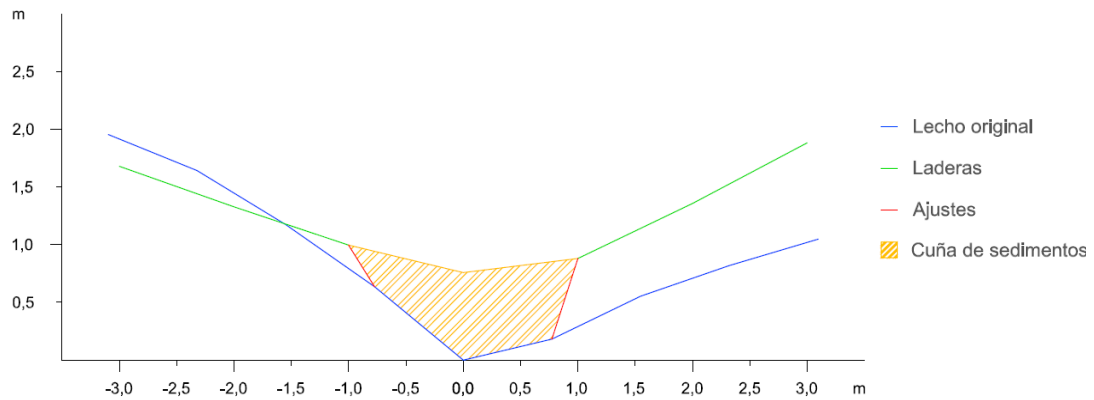


Figura A2.114. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 22

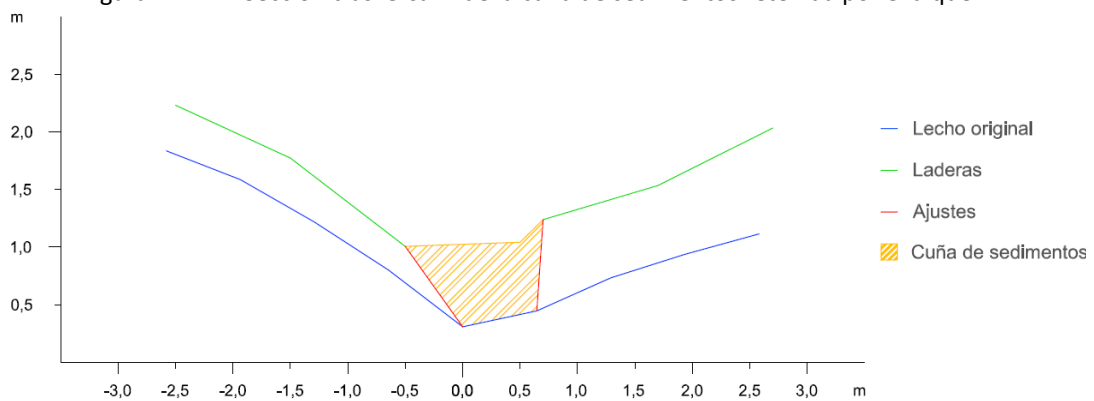


Figura A2.115. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 22

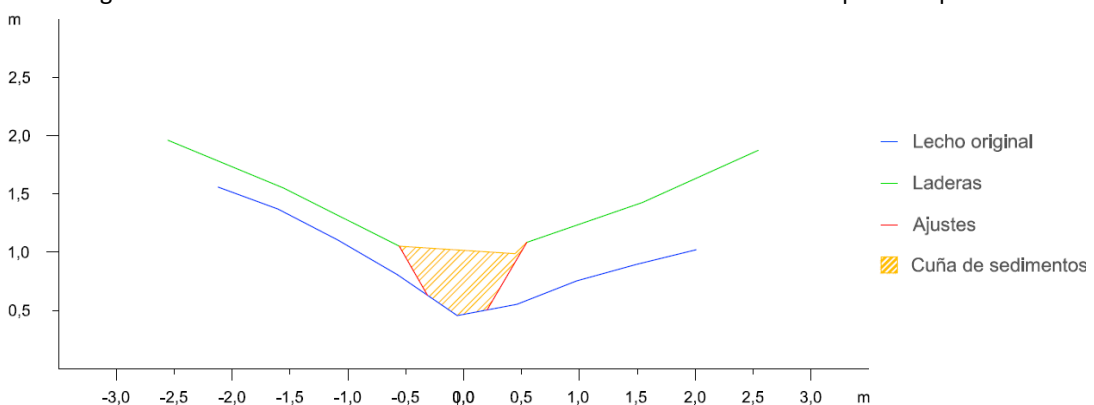


Figura A2.116. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 22

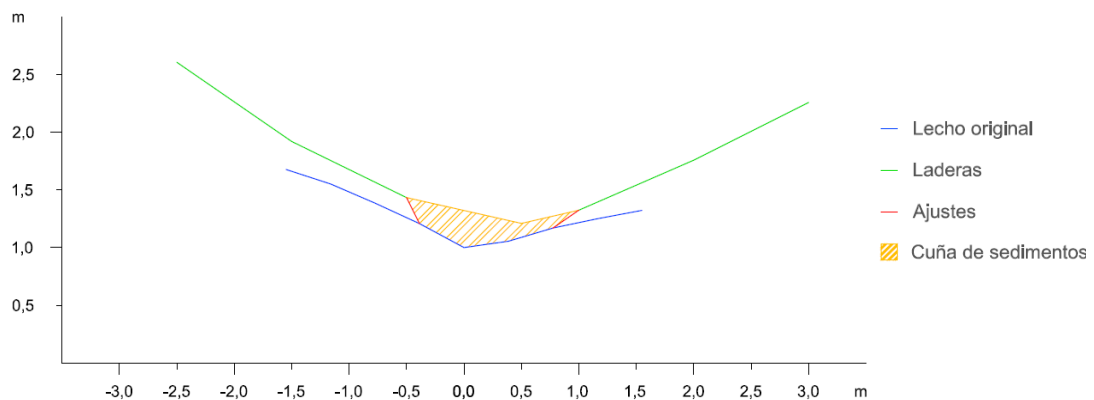


Figura A2.117. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 22

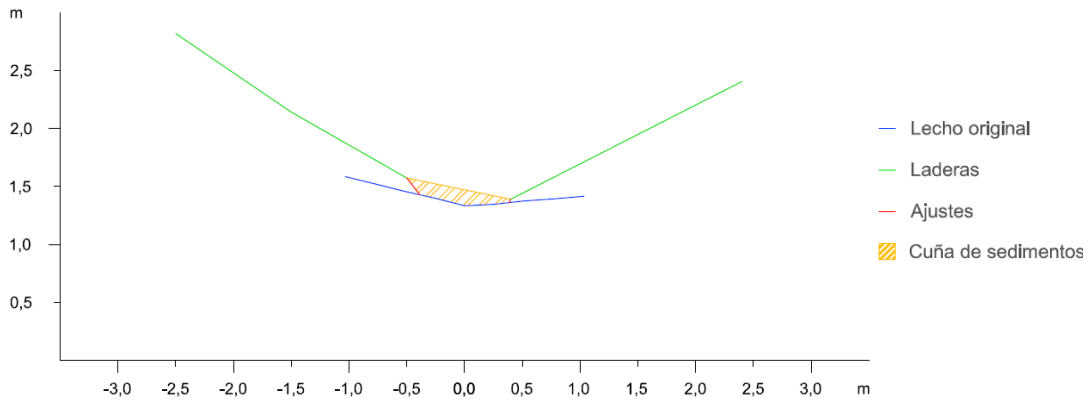


Figura A2.118. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 22

Dique 23

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 23 (Tabla A2.23) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.119 a A2.123).

Tabla A2.23. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 23

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	0,7753	1,5537	1	1,8757	1,5630
2		0,2605		3		
2	3,0	0,2605	0,4784	2	0,5057	0,3504
3		0,0584		4		
3	3,0	0,0584	0,1050	3	1,5048	0,0696
4		0,0116		5		
4	3,0	0,0116	2,1174	4	4,0216	6,0200
5		1,4000		Fin cuña		
5	1,3	1,4000	0,9100	Opción 1	4,2905	2,5426
Fin cuña		0,0000		Opción 2	6,0810	7,9241
Volumen total			5,1645		5,1858	5,2334
Errores			A ₁ = -0,0213		A ₂ = 0,0476	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

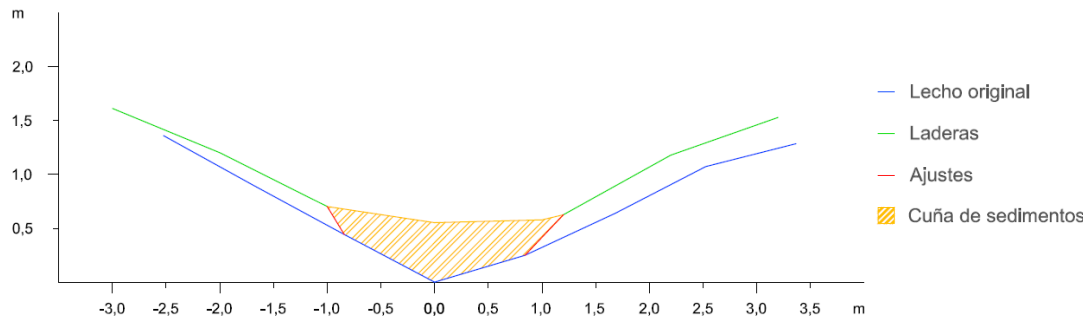


Figura A2.119. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 23

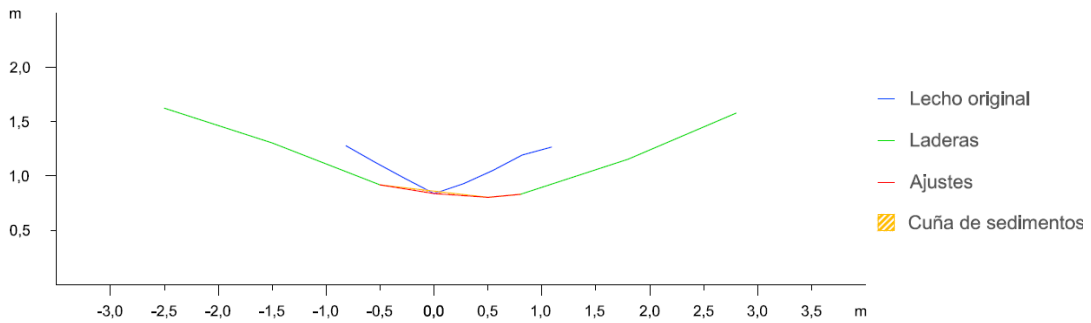


Figura A2.120. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 23

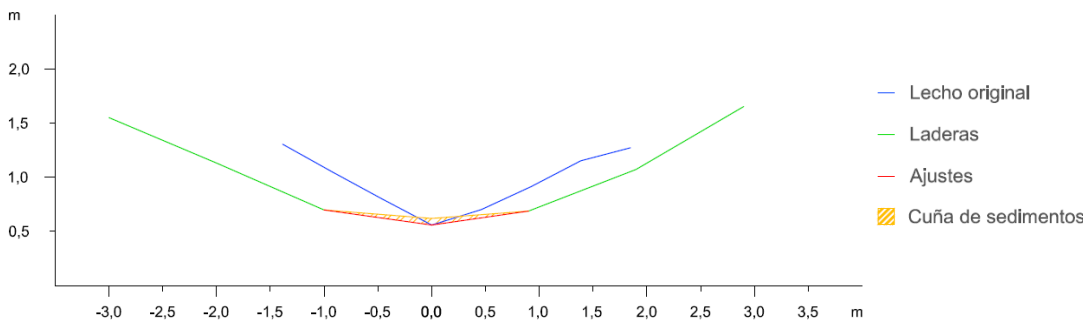


Figura A2.121. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 23

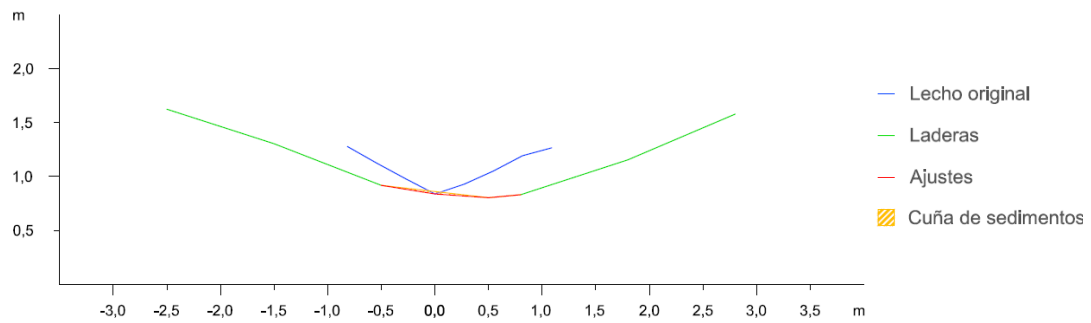


Figura A2.122. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 23

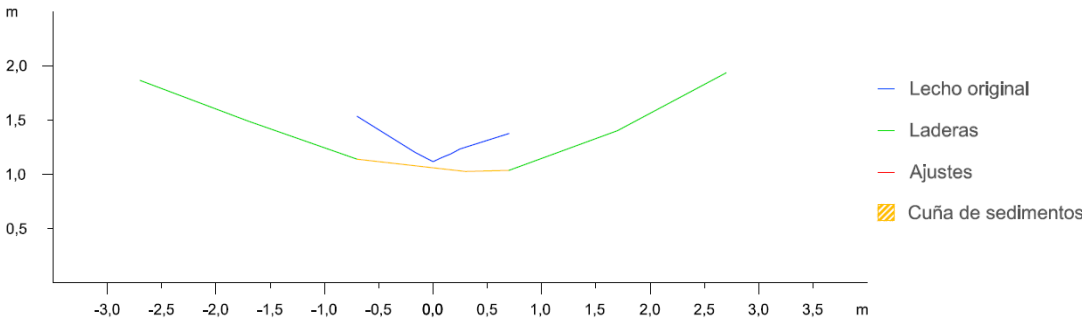


Figura A2.123. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 23

Dique 24

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 24 (Tabla A2.24) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.124 a A2.128).

Tabla A2.24. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 24

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	1,9159	2,9739	1	4,4583	4,2320
2		1,0580		3		
2	2,0	1,0580	1,5976	2	2,2167	2,1584
3		0,5396		4		
3	2,0	0,5396	0,6482	3	1,4493	0,4344
4		0,1086		5		
4	2,0	0,1086	1,3086	4	2,8634	4,2000
5		1,2000		Fin cuña		
5	1,5	1,2000	0,9000	Opción 1	6,8077	5,5664
Fin cuña		0,0000		Opción 2	8,0539	9,3323
Volumen total			7,4283		7,4308	7,4494
Errores			A ₁ = -0,0025		A ₂ = 0,0186	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

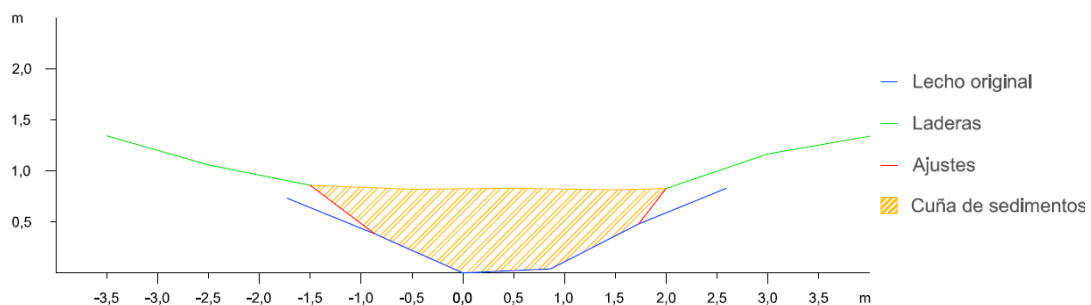


Figura A2.124. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 24

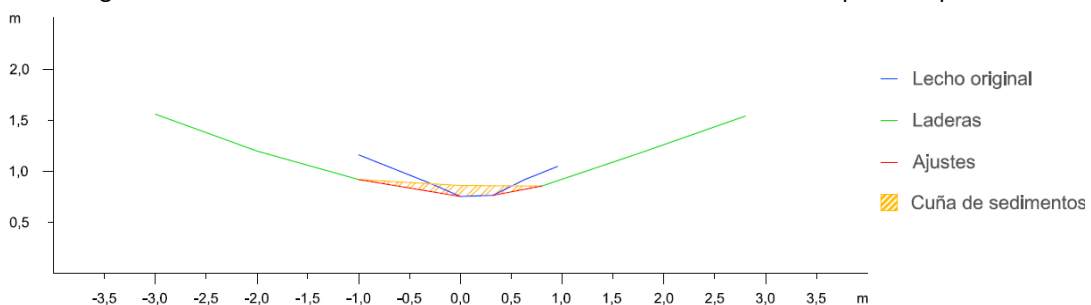


Figura A2.125. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 24

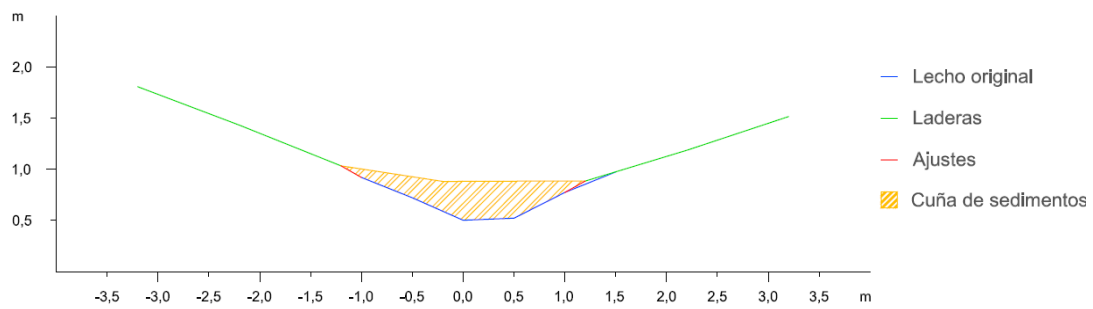


Figura A2.126. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 24

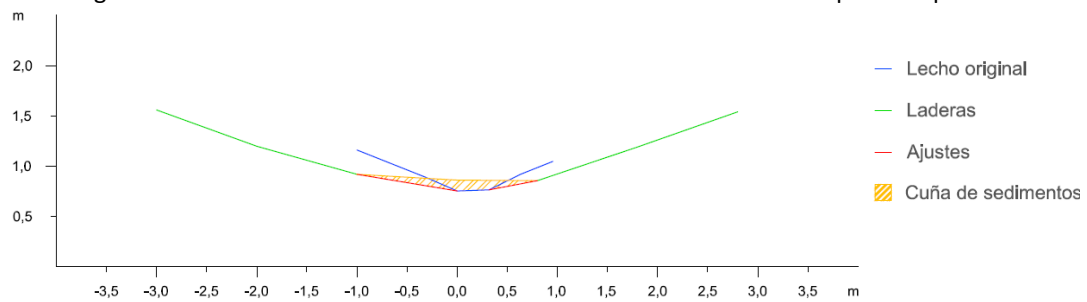


Figura A2.127. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 24

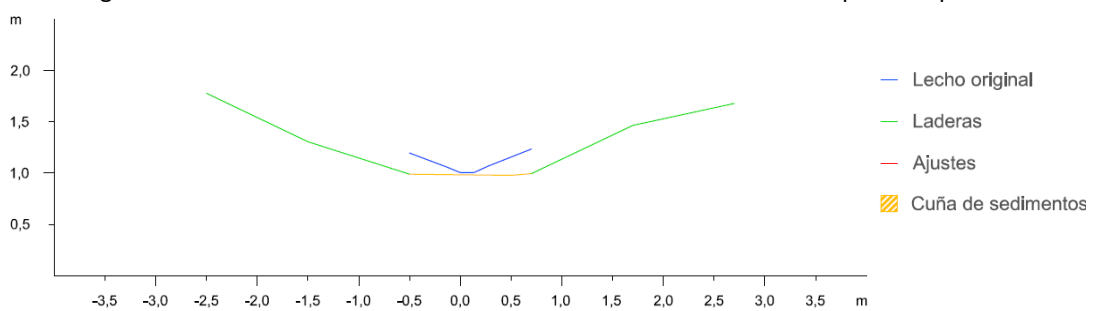


Figura A2.128. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 24

Dique 25

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 25 (Tabla A2.25) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.129 a A2.136).

Tabla A2.25. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	4	47,9943	174,0468	1	307,6632	312,2328
2		39,0291		3		
2	4	39,0291	131,3316	2	215,5188	213,0936
3		26,6367		4		
3	4	26,6367	85,3998	3	137,4903	128,5056
4		16,0632		5		
4	4	16,0632	56,5828	4	90,3691	97,8256
5		12,2282		6		
5	4	12,2282	30,0580	5	31,9548	22,4064
6		2,8008		7		
6	4	2,8008	6,6710	6	6,5861	4,2776
7		0,5347		8		
7	4	0,5347	1,0694	7	0,4812	0,0000
8		0,0000		Fin		
8	1,4	0,0000	0,0000	Opción 1	477,5895	463,1448
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			485,1594		482,0551	476,1942
Errores			A ₁ = 3,1043		A ₂ = -5,8609	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

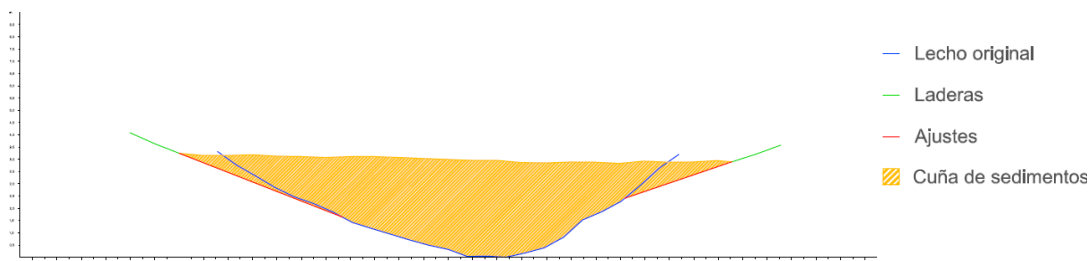


Figura A2.129. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

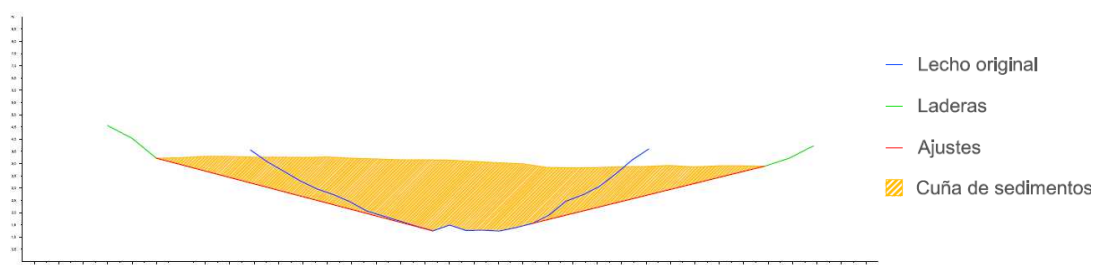


Figura A2.130. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

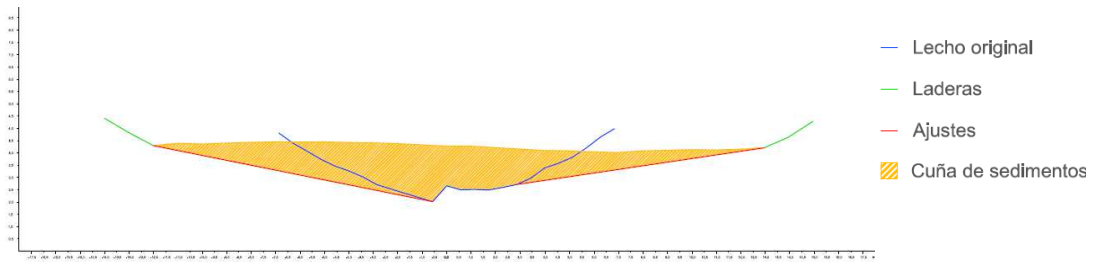


Figura A2.131. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

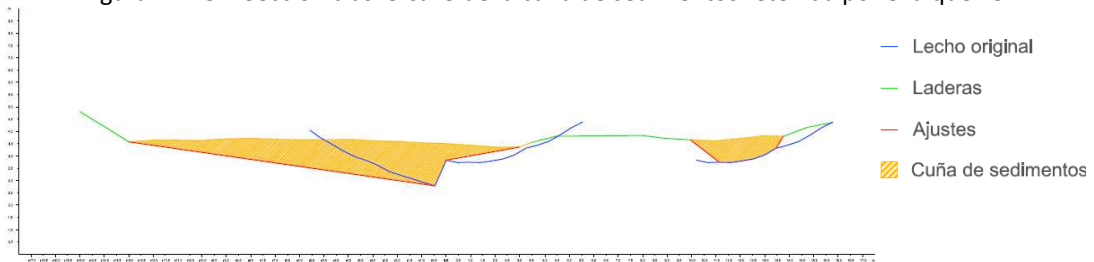


Figura A2.132. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

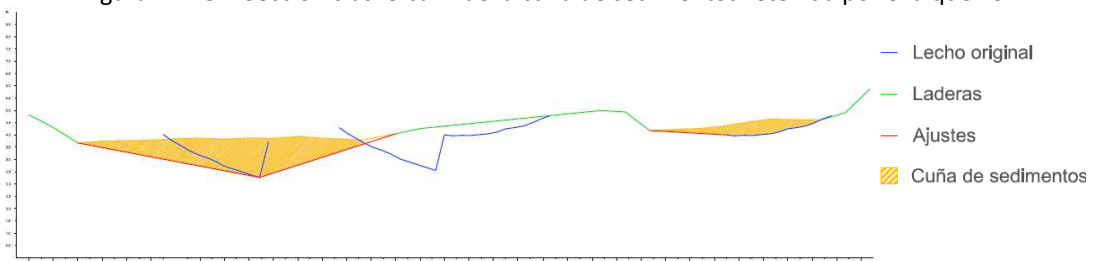


Figura A2.133. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25



Figura A2.134. Sección trasversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

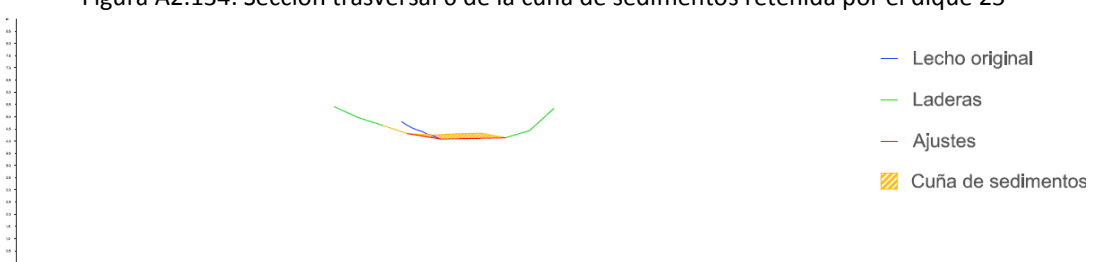


Figura A2.135. Sección trasversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

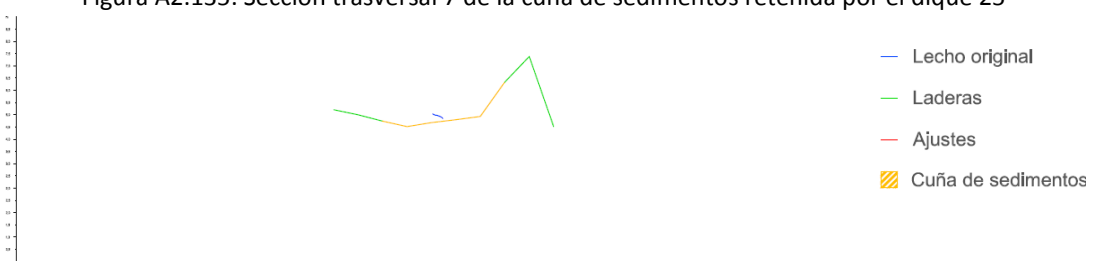


Figura A2.136. Sección trasversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 25

Dique 27

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 27 (Tabla A2.26) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.137 a A2.140).

Tabla A2.26. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 27

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	48,3715	92,2340	1	101,8559	78,7068
2		13,1178		3		
2	3,0	13,1178	21,1965	2	17,8344	6,0792
3		1,0132		4		
3	3,0	1,0132	2,5155	3	3,6073	3,9164
4		0,6638		5		
4	2,90	0,6638	0,9625	Opción 1	105,4632	82,6232
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			116,9085		108,2470	90,9494
Errores			A ₁ = 8,6615		A ₂ = -17,2976	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

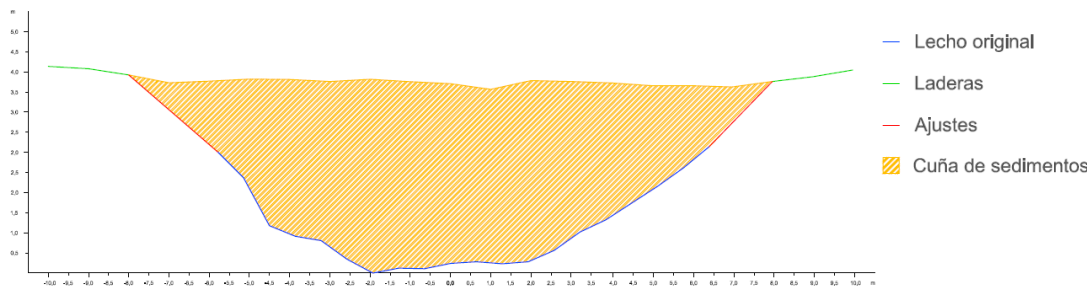


Figura A2.137. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 27

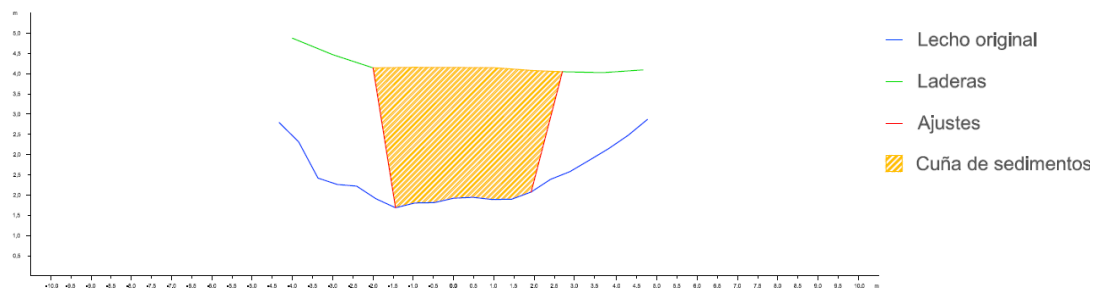


Figura A2.138. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 27

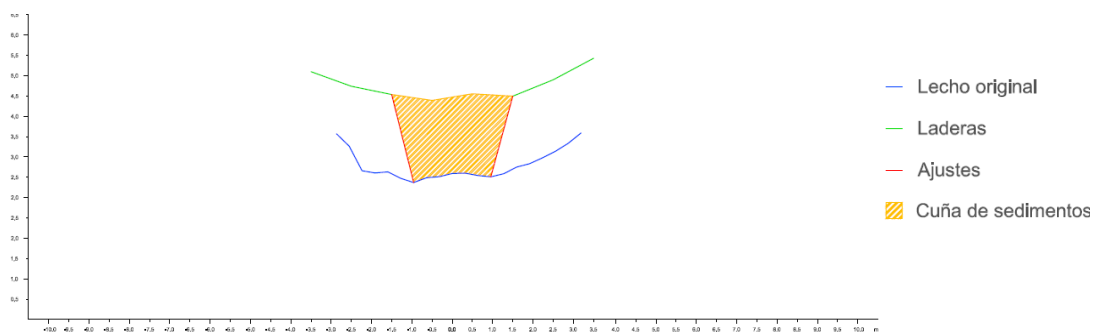


Figura A2.139. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 27

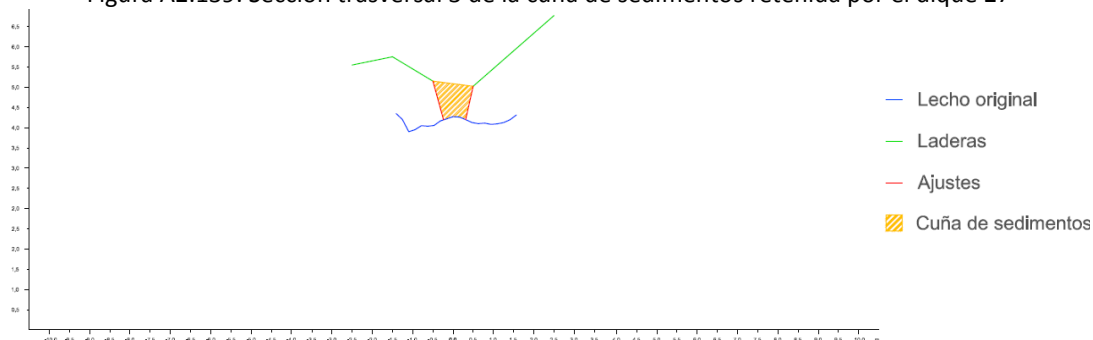


Figura A2.140. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 27

Dique 28

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 28 (Tabla A2.27) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.141 a A2.145).

Tabla A2.27. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 28

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	7,0294	19,9101	1	35,5403	37,4640
2		6,2440		3		
2	3,0	6,2440	14,6684	2	20,6850	21,2094
3		3,5349		4		
3	3,0	3,5349	5,7545	3	4,8155	1,8084
4		0,3014		5		
4	3,0	0,3014	0,5646	4	0,3548	0,2655
5		0,0750		Fin cuña		
5	0,5	0,0750	0,0203	Opción 1	40,3761	39,2927
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			40,9178		40,6630	40,3388
Errores			A ₁ = 0,2548		A ₂ = -0,3242	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

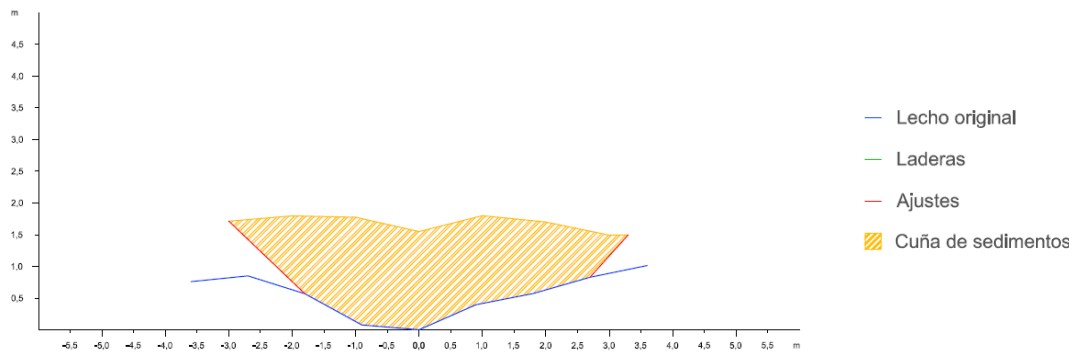


Figura A2.141. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 28

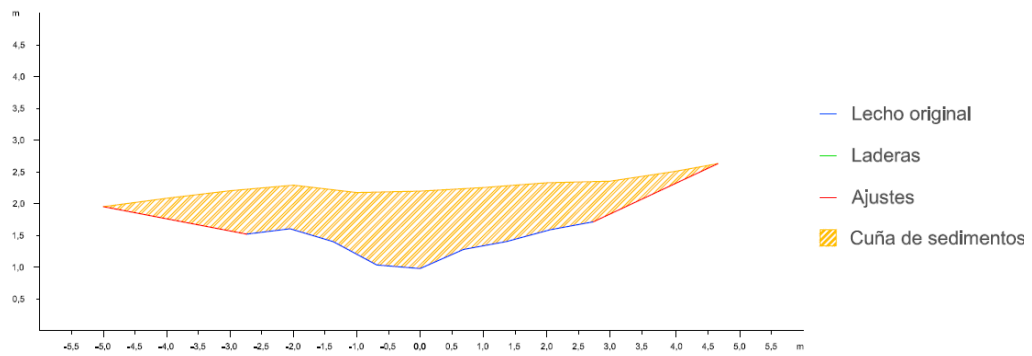


Figura A2.142. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 28

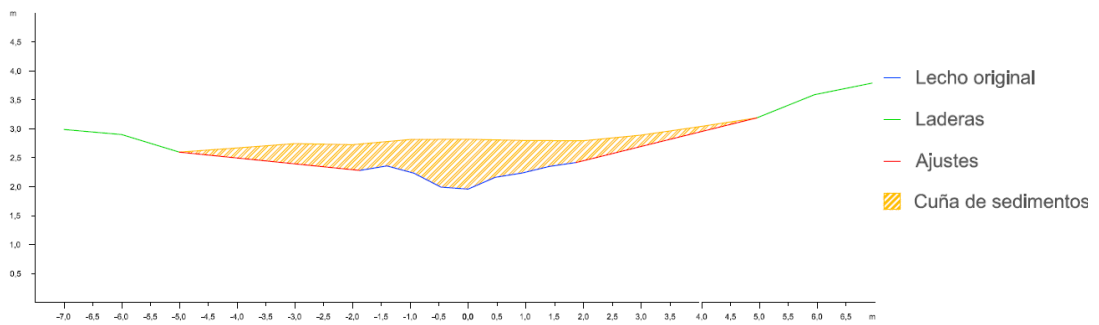


Figura A2.143. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 28

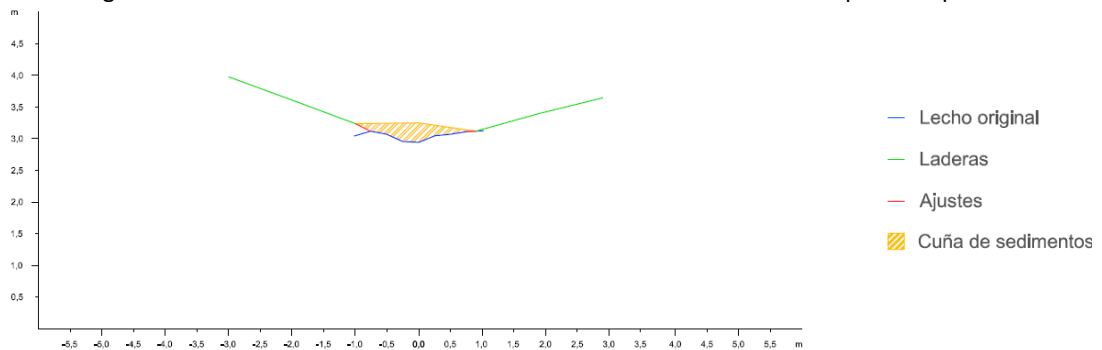


Figura A2.144. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 28

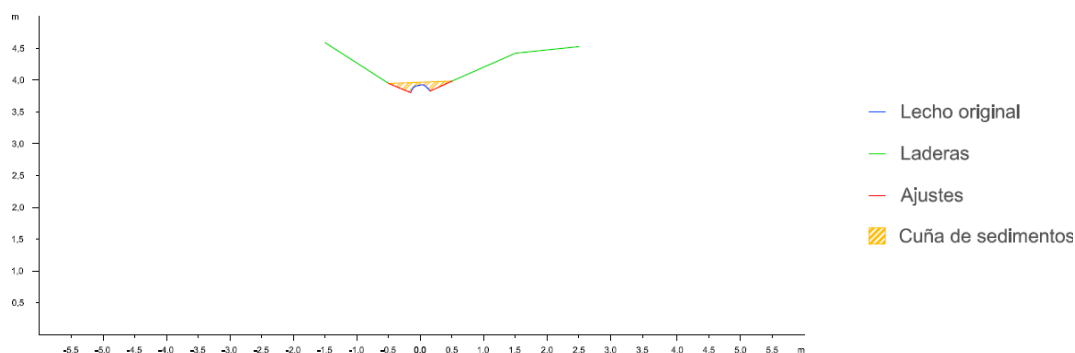


Figura A2.145. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 28

Dique 29

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 29 (Tabla A2.28) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.146 a A2.150).

Tabla A2.28. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 29

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		10,1041		1		
2	1,0	3,2545	6,6793	3	7,9298	6,5090
2		3,2545		2		
3	1,0	0,6673	1,9609	4	2,0457	1,3346
3		0,6673		3		
4	1,0	0,2135	0,4404	5	0,5332	0,4270
4		0,2135		4		
5	1,0	0,0784	0,1460	Fin cuña	0,1054	0,0941
5		0,0784		Opción 1	8,4709	6,9438
Fin cuña	0,2	0,0000	0,0078	Opción 2	8,8305	8,1080
Volumen total			9,2344		8,6507	7,5259
Errores			A ₁ = 0,5837		A ₂ = -1,1248	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

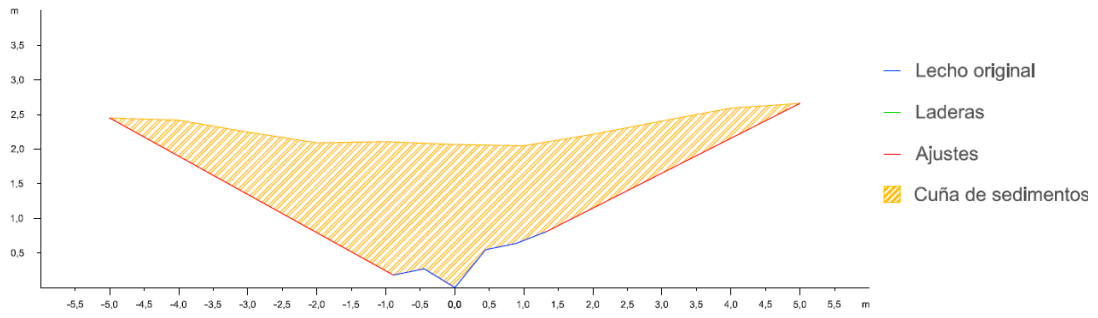


Figura A2.146. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 29

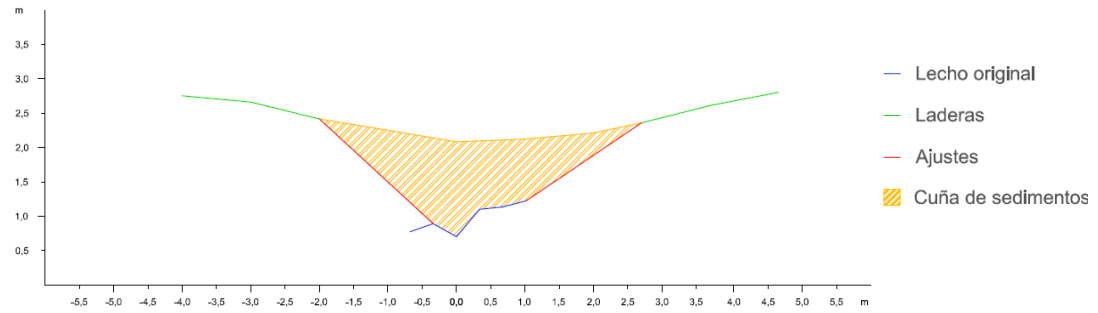


Figura A2.147. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 29

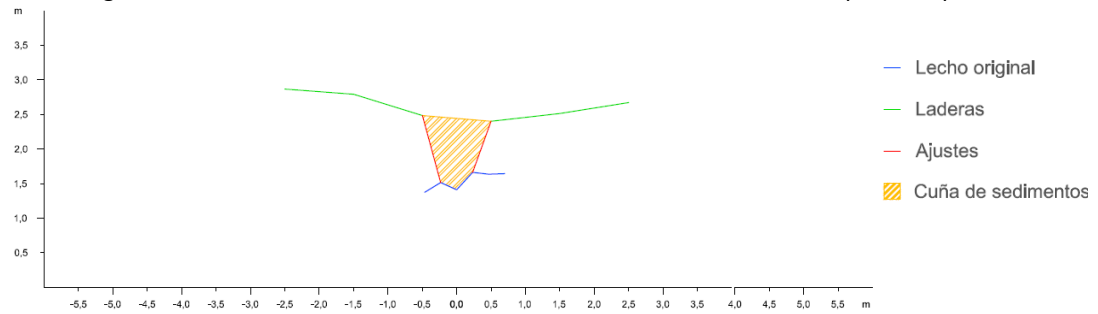


Figura A2.148. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 29

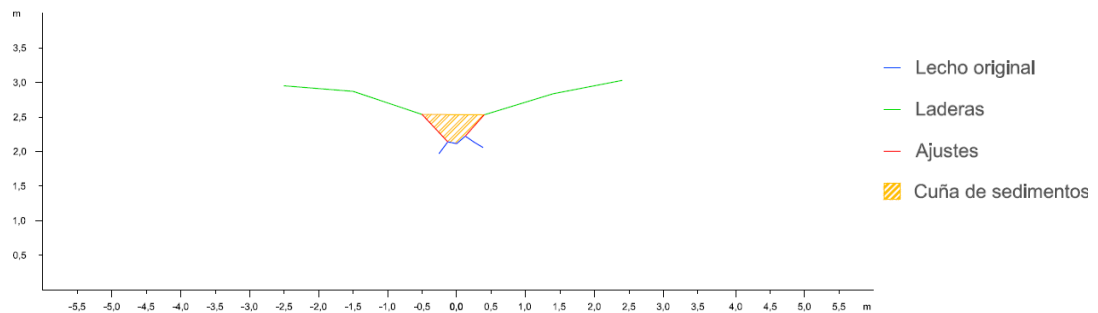


Figura A2.149. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 29

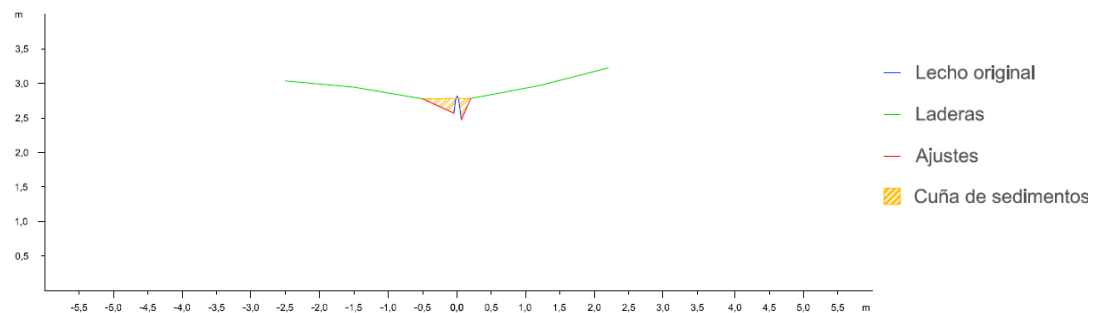


Figura A2.150. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 29

Dique 30

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 30 (Tabla A2.29) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.151 a A2.154).

Tabla A2.29. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 30

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	15,6391	32,3886	1	41,2258	35,7198
2		5,9533		3		
2	3,0	5,9533	11,5902	2	13,2150	10,6410
3		1,7735		4		
3	3,0	1,7735	2,9118	3	2,2406	0,9224
4		0,1677		5		
4	2,50	0,1677	0,2096	Opción 1	43,4664	36,6422
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			47,1002		44,6398	39,9407
Errores			A ₁ = 2,4604		A ₂ = -4,6991	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

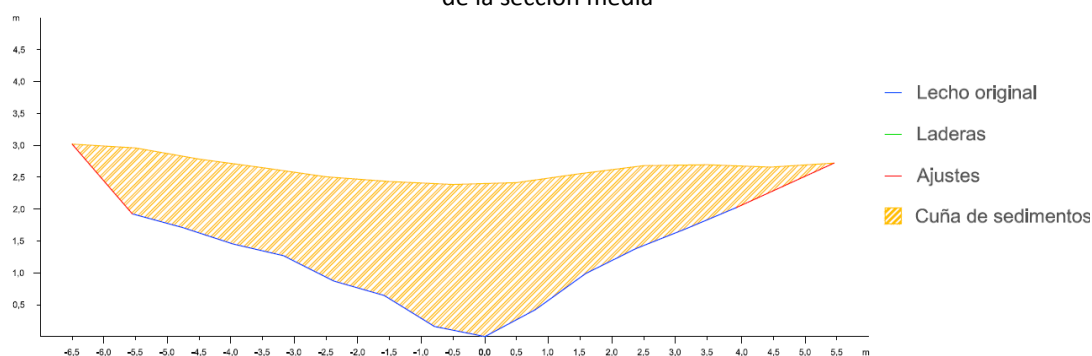


Figura A2.151. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 30

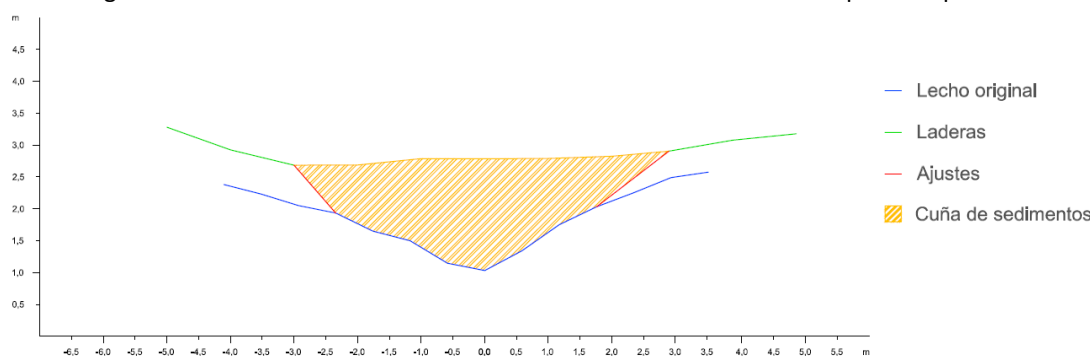


Figura A2.152. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 30

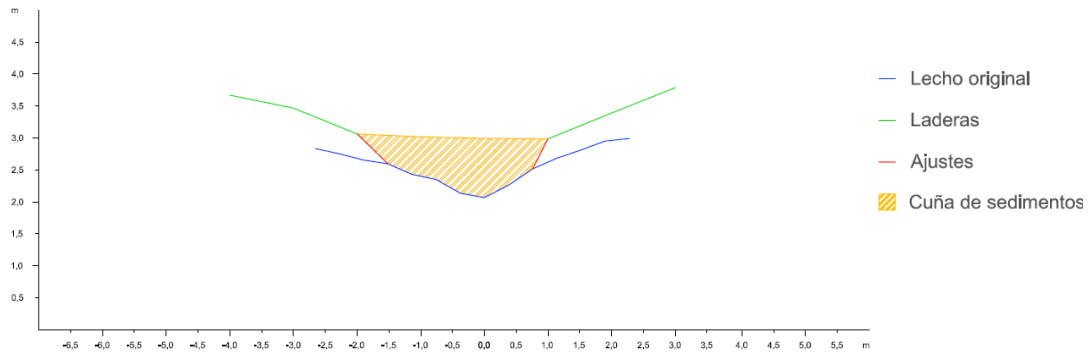


Figura A2.153. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 30

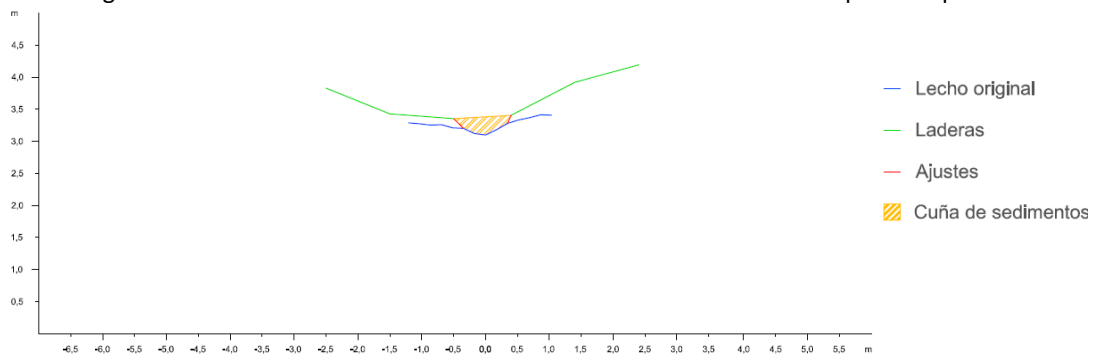


Figura A2.154. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 30

Dique 32

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 32 (Tabla A2.30) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.155 a A2.160).

Tabla A2.30. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		13,7059		1		
2	5,0	2,0205	39,3160	3	47,8418	20,2050
2		2,0205		2		
3	5,0	6,9172	22,3443	4	49,4822	69,1720
3		6,9172		3		
4	5,0	0,0000	17,2930	5	12,3887	0,0000
4		0,0000		4		
5	5,0	0,5160	1,2900	6	3,8588	5,1600
5		0,5160		5		
6	5,0	0,2513	1,9183	7	1,7240	1,7088
6		0,2513				
Fin	1,8	0,0000	0,2262	Opción 1	61,9545	21,9138
				Opción 2	92,8832	113,8742
Volumen total			82,3877		77,4188	67,8940
Errores			A ₁ = 4,9688		A ₂ = -9,5248	

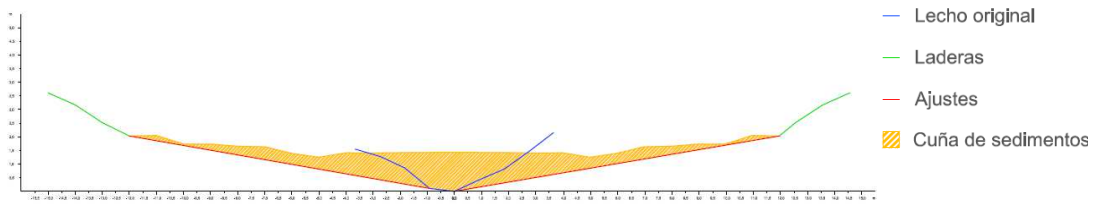


Figura A2.155. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

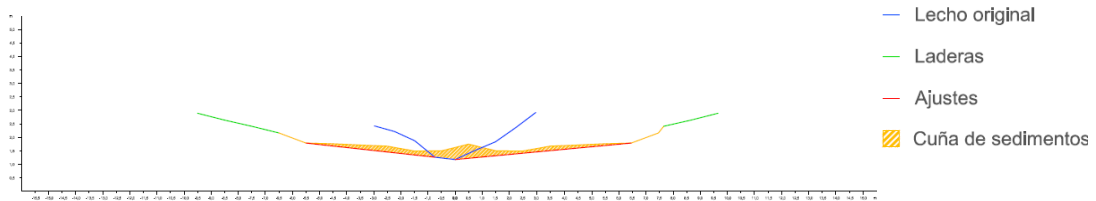


Figura A2.156. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

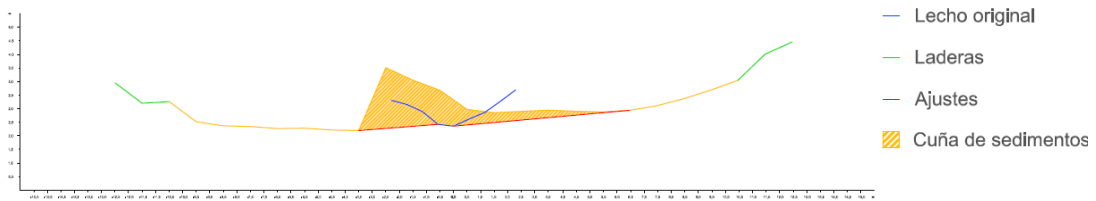


Figura A2.157. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

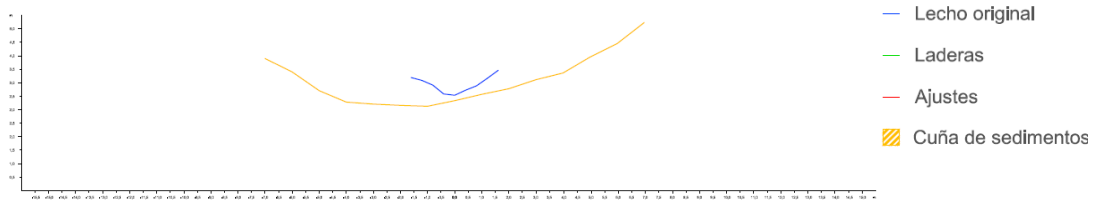


Figura A2.158. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

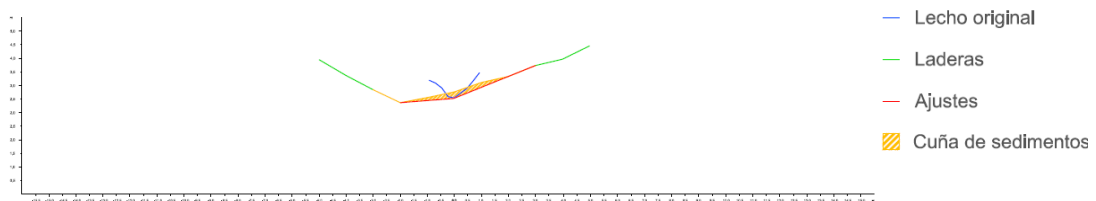


Figura A2.159. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

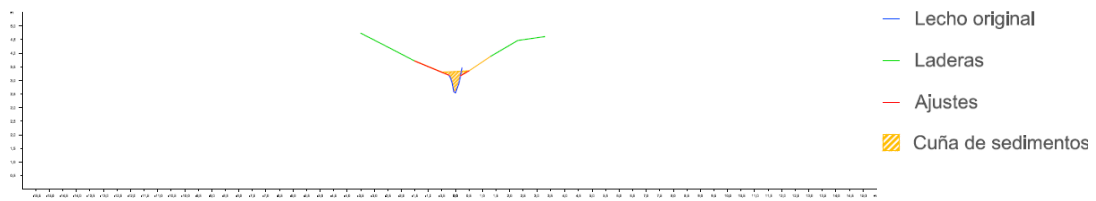


Figura A2.160. Sección trasversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 32

Dique 33

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 33 (Tabla A2.31) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.161 a A2.165).

Tabla A2.31. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 33

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	32,0652	21,5041	1	27,2649	21,8858
2		10,9429		3		
2	1,0	10,9429	8,4504	2	12,4708	11,9156
3		5,9578		4		
3	1,0	5,9578	4,2981	3	5,6253	5,2768
4		2,6384		5		
4	1,0	2,6384	1,5015	4	1,0241	0,5468
5		0,3645		Fin cuña		
5	0,5	0,3645	0,0911	Opción 1	32,9813	27,2537
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			35,8451		33,9901	30,6101
Errores			A ₁ = 1,8549		A ₂ = -3,3801	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

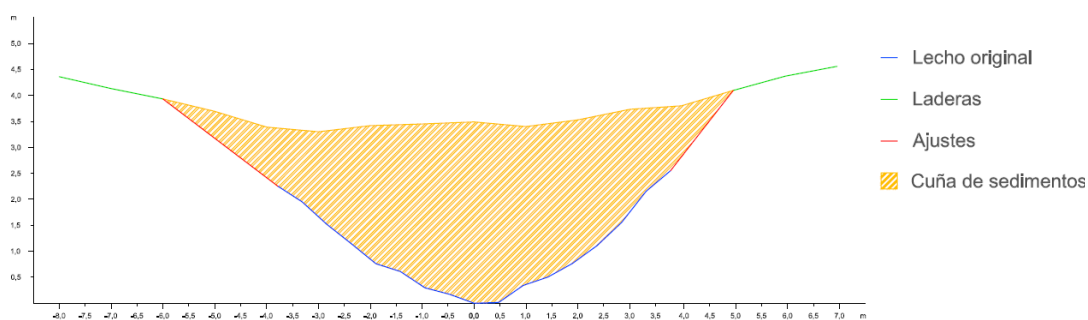


Figura A2.161. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 33

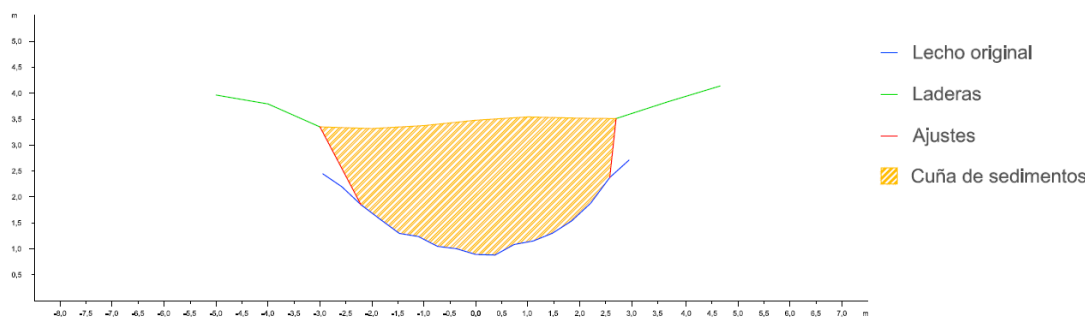


Figura A2.162. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 33

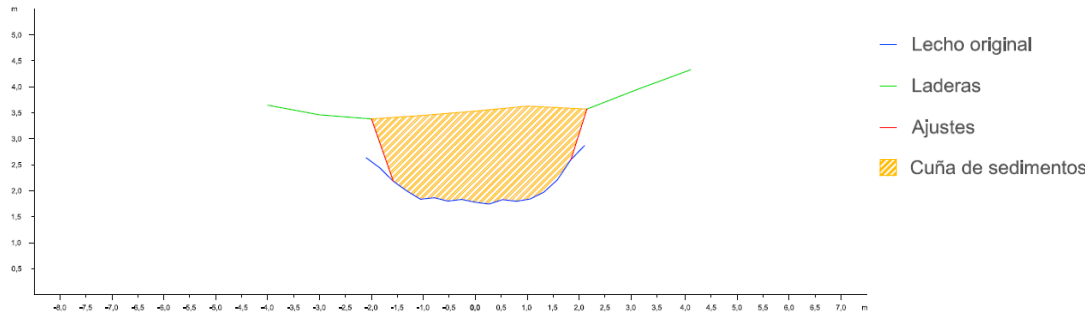


Figura A2.163. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 33

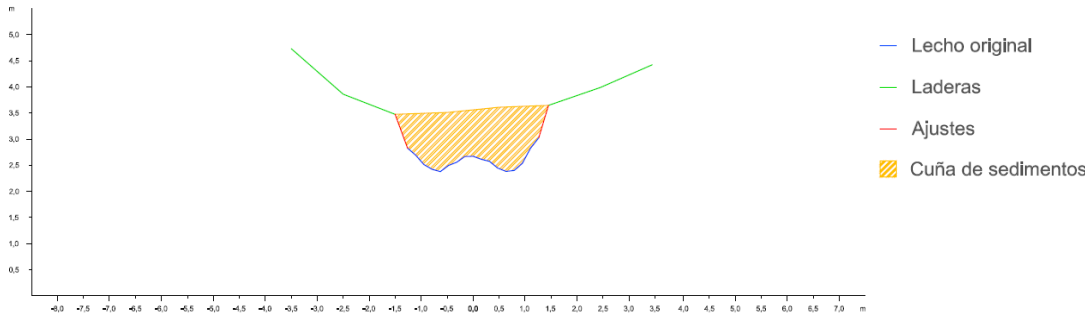


Figura A2.164. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 33

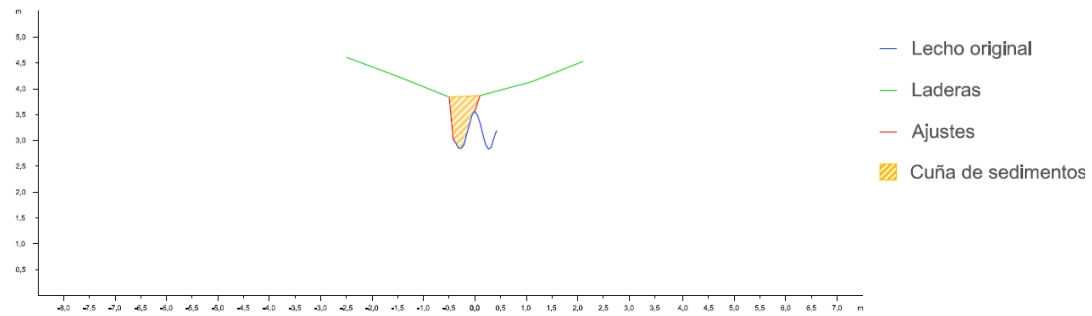


Figura A2.165. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 33

Dique 34

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 34 (Tabla A2.32) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.166 a A2.169).



Tabla A2.32. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 34

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	6,2947	5,5625	1	9,3441	9,6606
2		4,8303		3		
2	1,0	4,8303	3,6234	2	5,1577	4,8330
3		2,4165		4		
3	1,0	2,4165	1,6967	3	1,7918	1,6607
4		0,9769		5		
4	0,70	0,9769	0,3419	Opción 1	11,1360	11,3213
Fin cuña		0,0000		Opción 2	11,0621	10,7374
Volumen total			11,2245		11,0991	11,0294
Errores			A ₁ = 0,1255		A ₂ = -0,0697	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

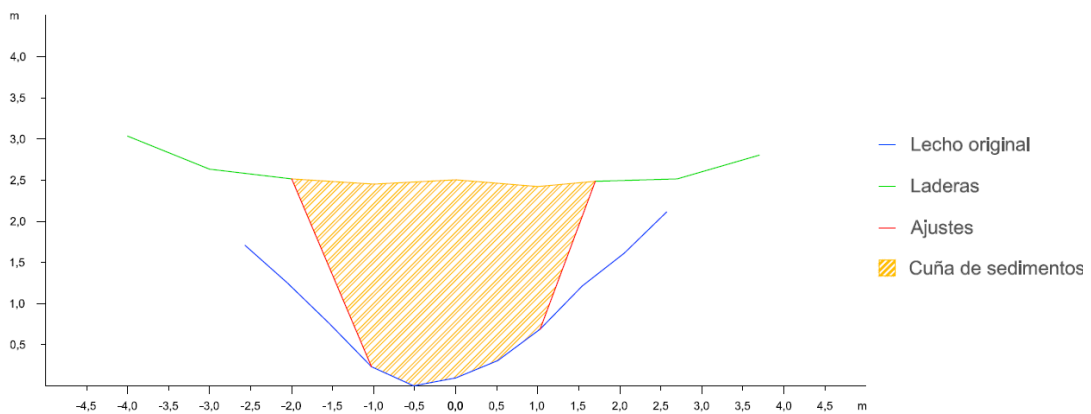


Figura A2.166. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 34

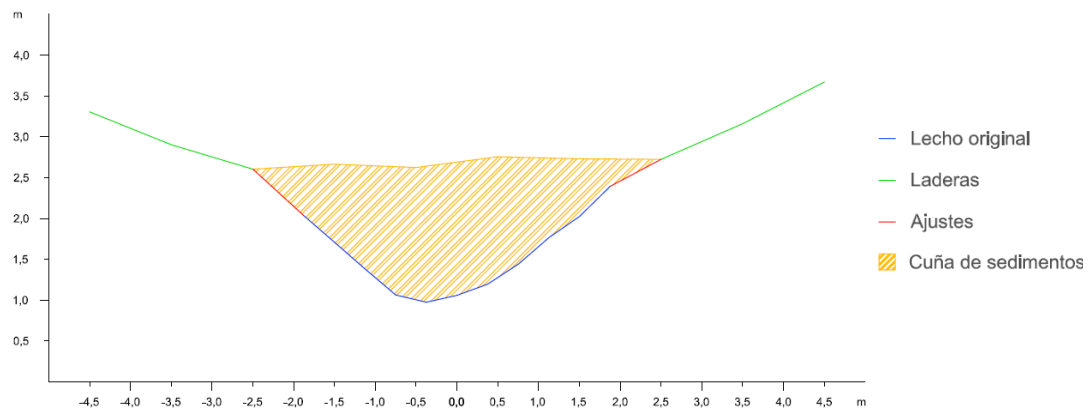


Figura A2.167. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 34

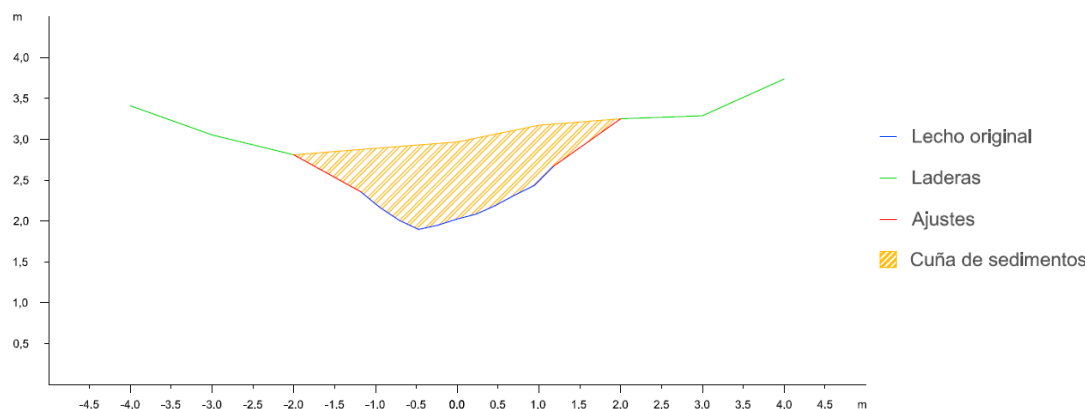


Figura A2.168. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 34

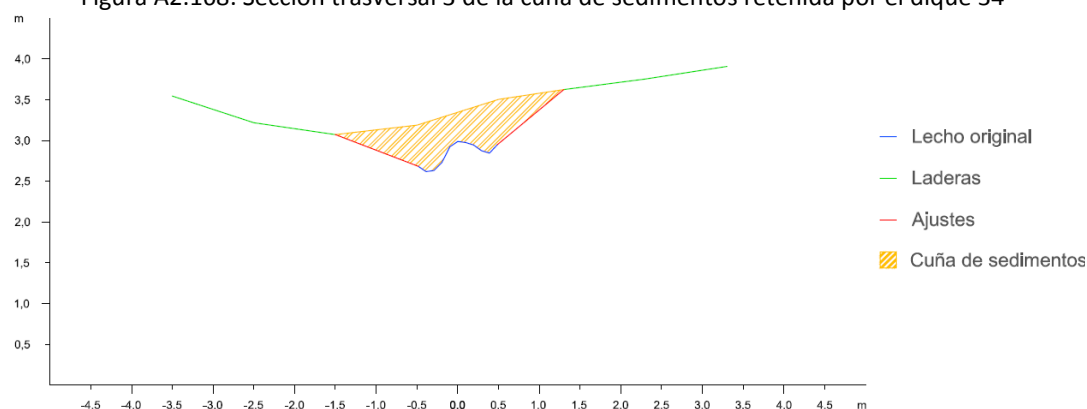


Figura A2.169. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 34

Dique 35

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 35 (Tabla A2.33) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.170 a A2.172).

Tabla A2.33. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 35

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	5,9563	7,7337	1	11,1599	7,1096
2		1,7774		3		
2	2,0	1,7774	5,4513	2	10,9820	14,6956
3		3,6739		4		
3	2,0	3,6739	3,6739	Opción 1	14,8338	10,7835
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			16,8589		16,7747	16,6064
Errores			A ₁ = 0,0842		A ₂ = -0,1683	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

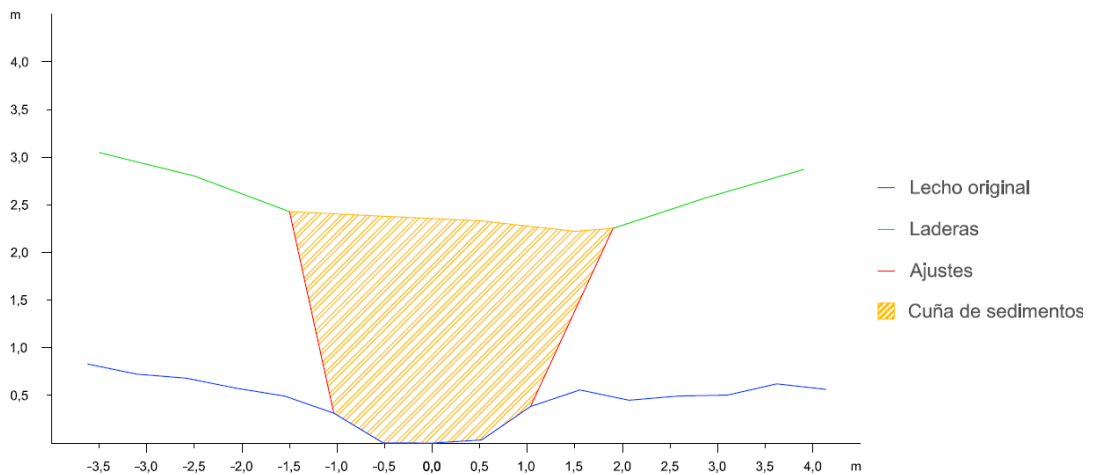


Figura A2.170. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 35

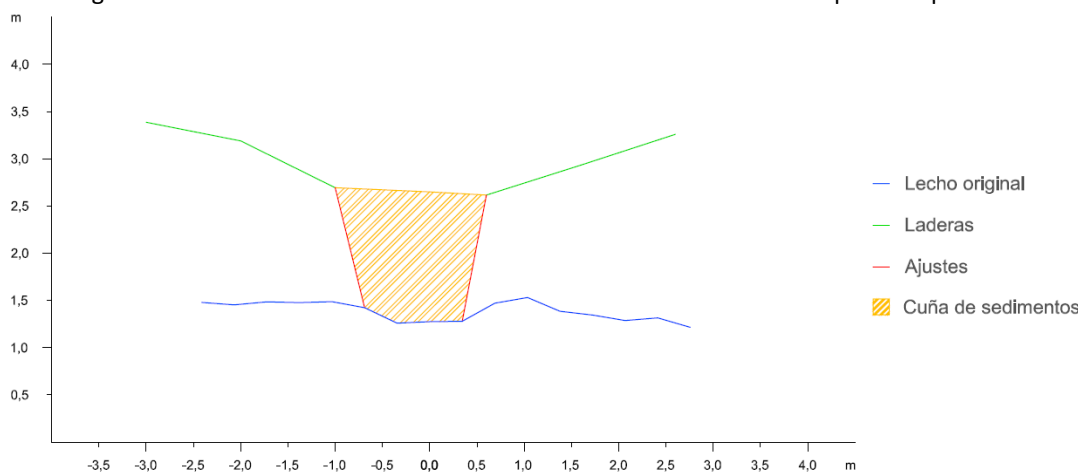


Figura A2.171. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 35

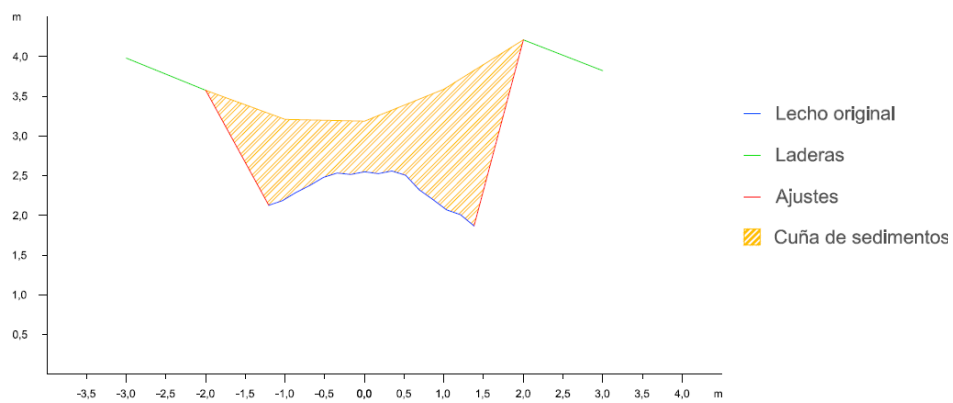


Figura A2.172. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 35

Dique 36

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 36 (Tabla A2.34) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.173 a A2.176).



Tabla A2.34. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 36

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	6,4527	12,4431	1	14,2314	11,0562
2		1,8427		3		
2	3,0	1,8427	3,3759	2	3,6928	2,4474
3		0,4079		4		
3	3,0	0,4079	0,9396	3	1,0896	1,1144
4		0,2185		5		
4	2,10	0,2185	0,2294	Opción 1	15,3210	12,1706
Fin cuña		0,0000		Opción 2	16,3653	15,1199
Volumen total			16,9880		15,8432	13,6452
Errores			A ₁ = 1,1449	A ₂ = -2,1979		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

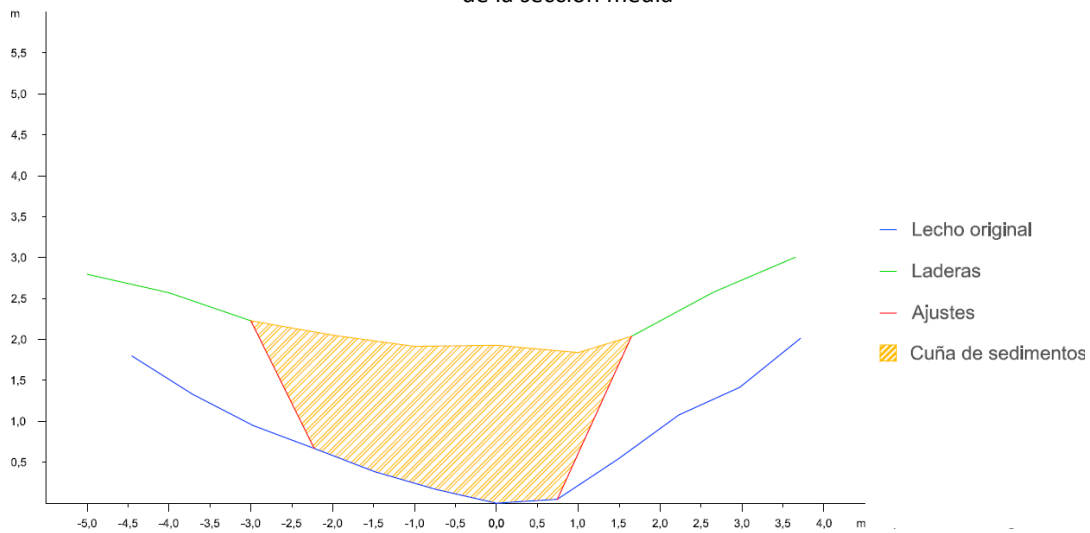


Figura A2.173. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 36

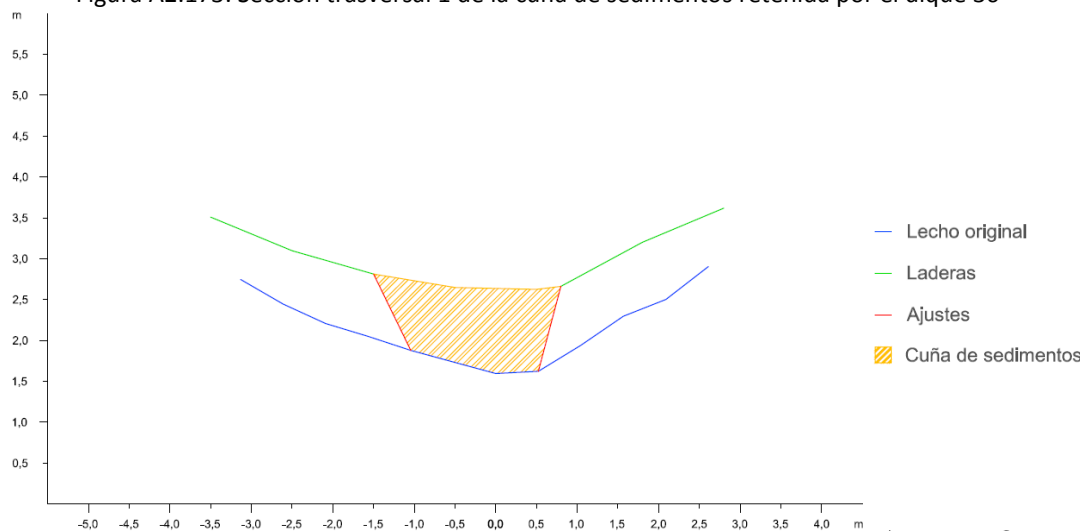


Figura A2.174. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 36

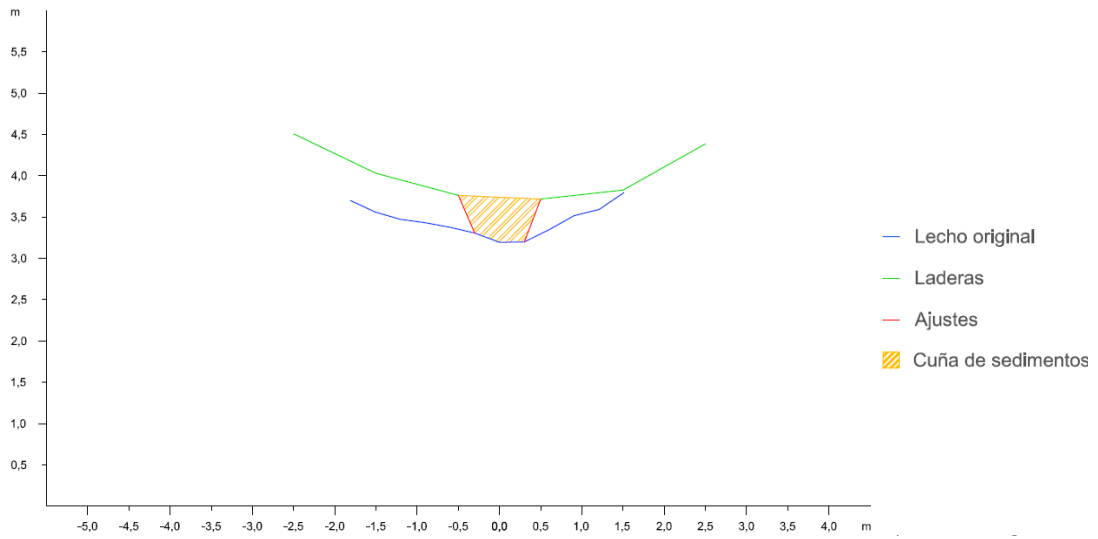


Figura A2.175. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 36

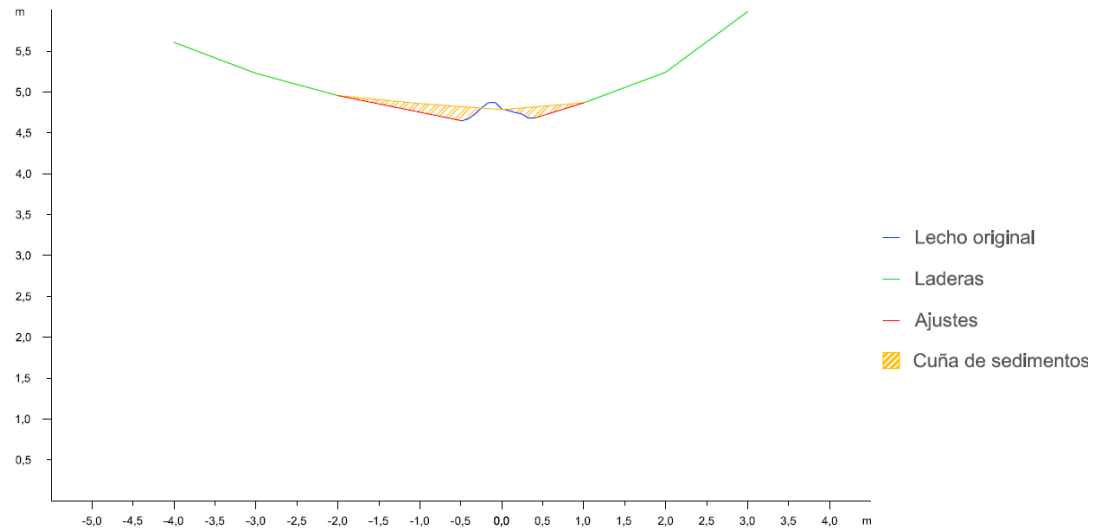


Figura A2.176. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 36

Dique 37

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 37 (Tabla A2.35) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.177 a A2.181).



Tabla A2.35. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 37

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,4793	3,8053	1	3,2975	1,3040
2		0,3260		3		
2	2,0	0,3260	0,4890	2	0,7191	0,6520
3		0,1630		4		
3	2,0	0,1630	0,2637	3	0,5986	0,4028
4		0,1007		5		
4	2,0	0,1007	0,4328	4	0,8098	1,1291
5		0,3321		Fin cuña		
5	1,4	0,3321	0,2325	Opción 1	4,1286	1,9393
Fin cuña		0,0000		Opción 2	5,3343	5,5864
Volumen total			5,2233		4,7314	3,7629
Errores			A ₁ = 0,4918		A ₂ = -0,9686	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

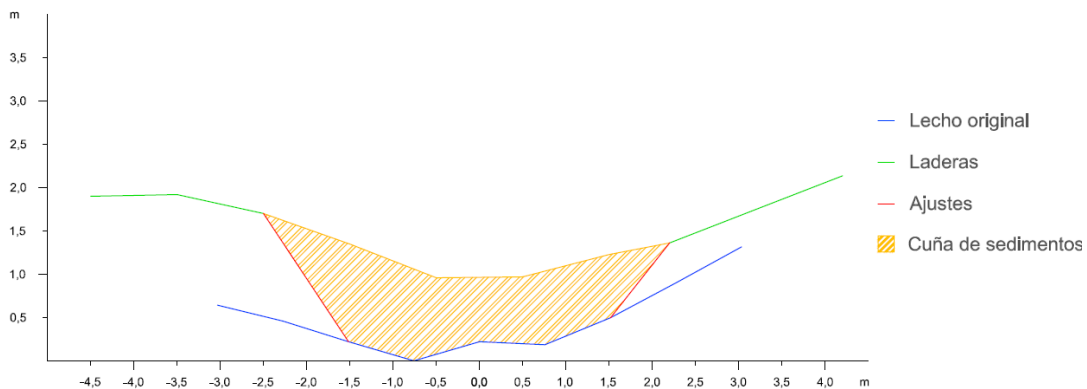


Figura A2.177. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 37

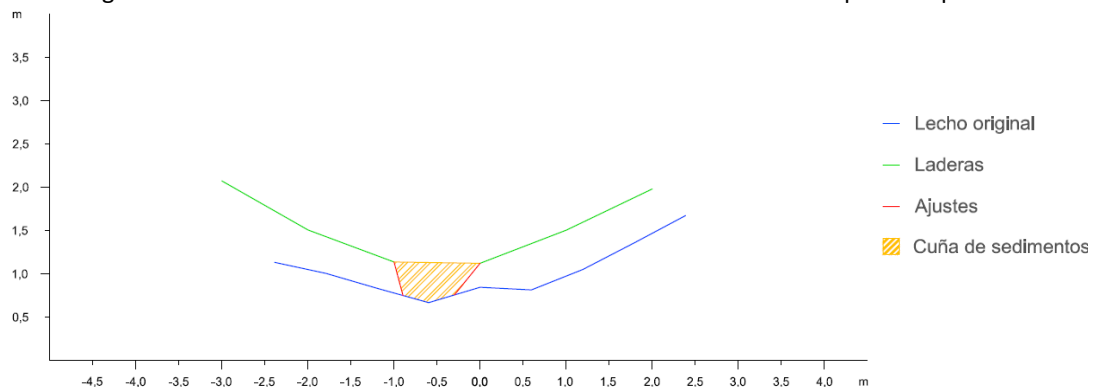


Figura A2.178. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 37

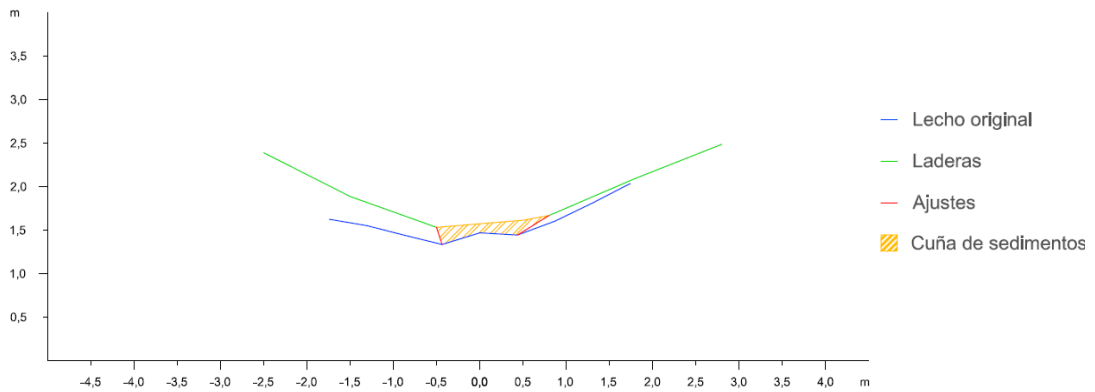


Figura A2.179. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 37

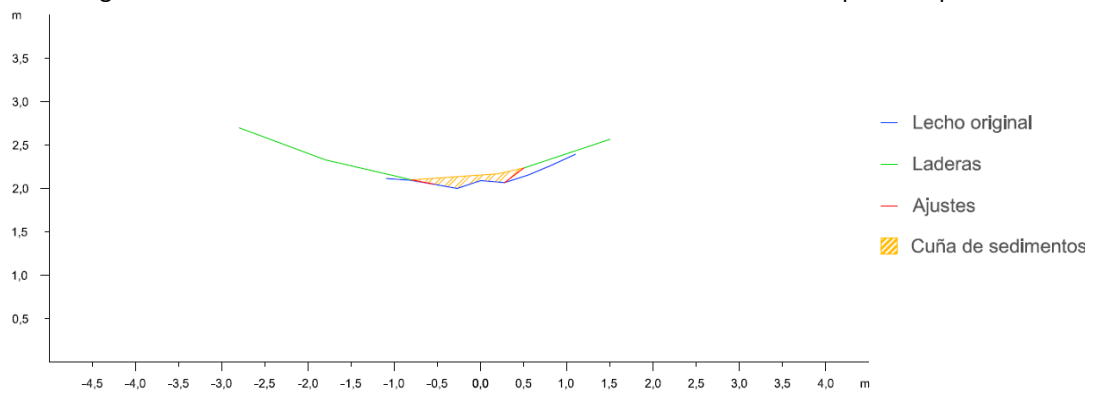


Figura A2.180. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 37

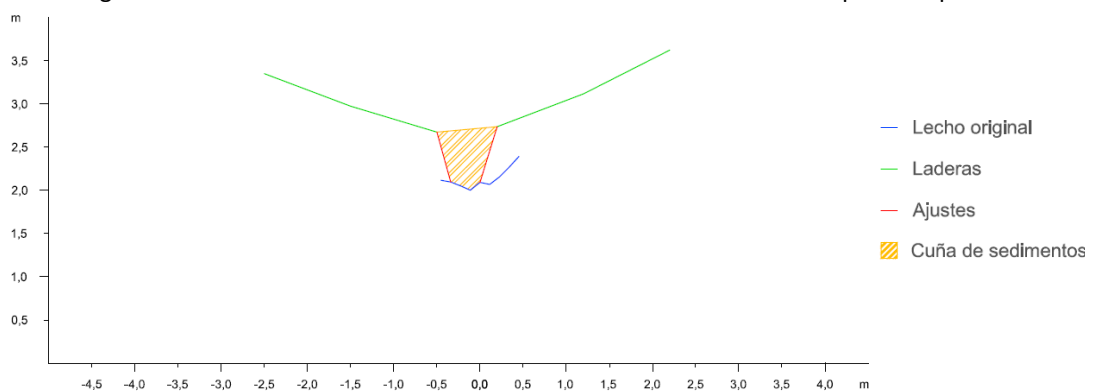


Figura A2.181. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 37

Dique 38

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 38 (Tabla A2.36) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.182 a A2.184).



Tabla A2.36. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 38

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,5584	0,9201	1	0,9252	0,5636
2		0,2818		3		
2	1,0	0,2818	0,1859	2	0,2054	0,1728
3		0,0900		Fin cuña		
3	0,9	0,0900	0,0414	Opción 1	0,9666	0,6050
Fin cuña		0,0000		Opción 2	1,1255	1,0929
Volumen total			1,1474		1,0460	0,8490
Errores			A₁= 0,1014		A₂= -0,1971	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

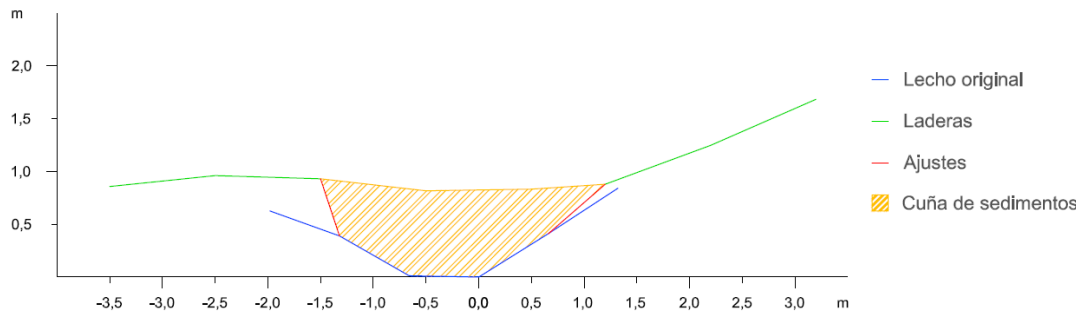


Figura A2.182. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 38

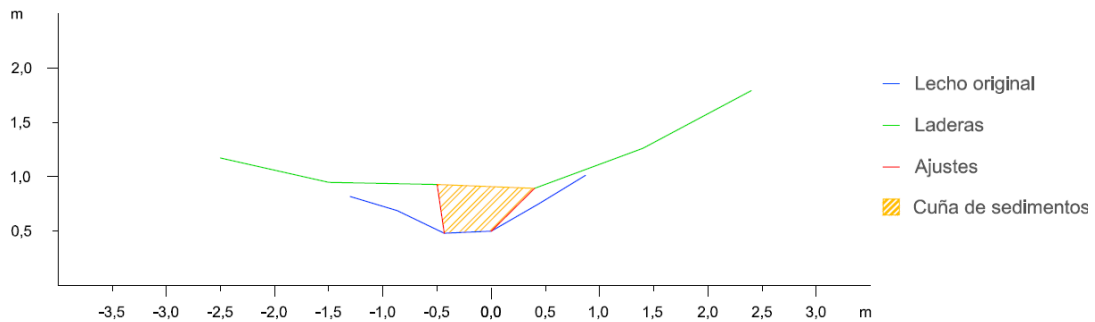


Figura A2.183. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 38

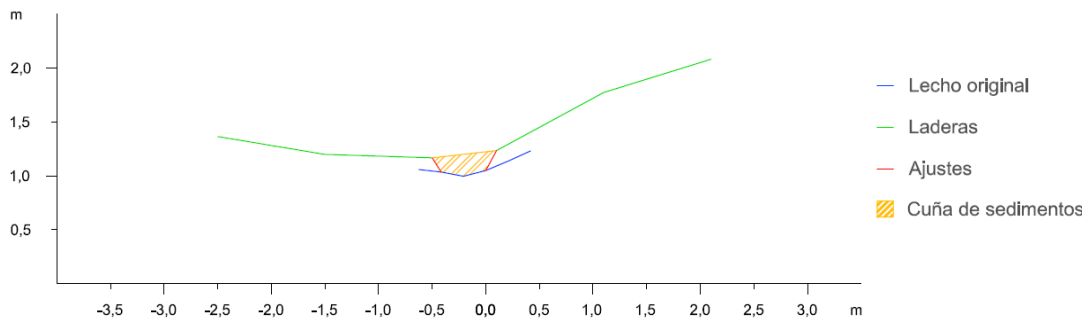


Figura A2.184. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 38

Dique 39

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 39 (Tabla A2.37) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.185 a A2.189).

Tabla A2.37. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 39

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	13,6298	22,0301	1	35,3874	33,6012
2		8,4003		3		
2	2,0	8,4003	14,2504	2	23,2905	23,4004
3		5,8501		4		
3	2,0	5,8501	8,9852	3	12,7433	12,5404
4		3,1351		5		
4	2,0	3,1351	3,8596	4	3,4188	2,4633
5		0,7245		Fin cuña		
5	1,4	0,7245	0,5072	Opción 1	48,6379	46,6488
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			49,6325		48,6886	47,2713
Errores			A ₁ = 0,9438		A ₂ = -1,4174	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

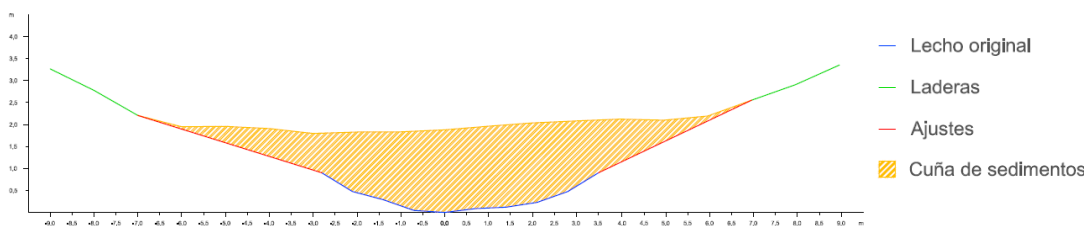


Figura A2.185. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 39

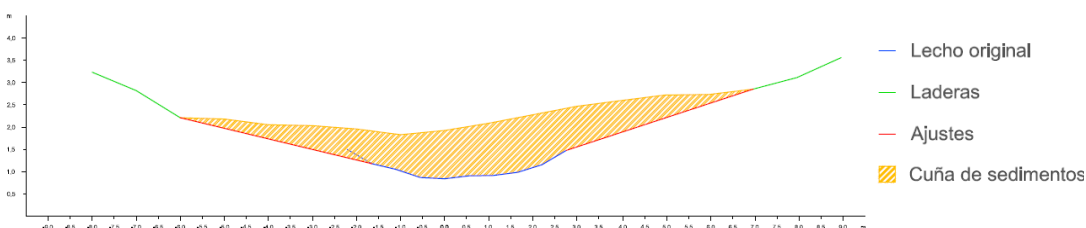


Figura A2.186. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 39

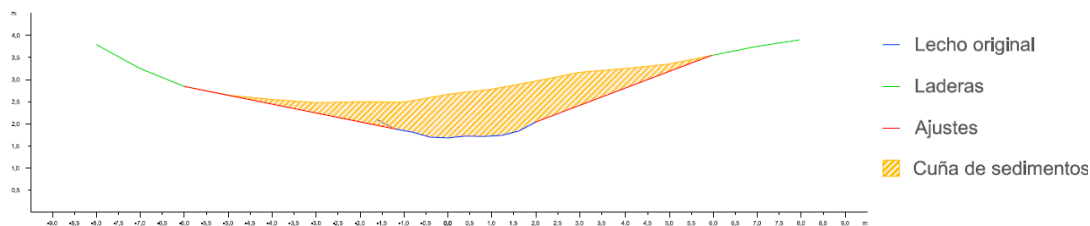


Figura A2.187. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 39

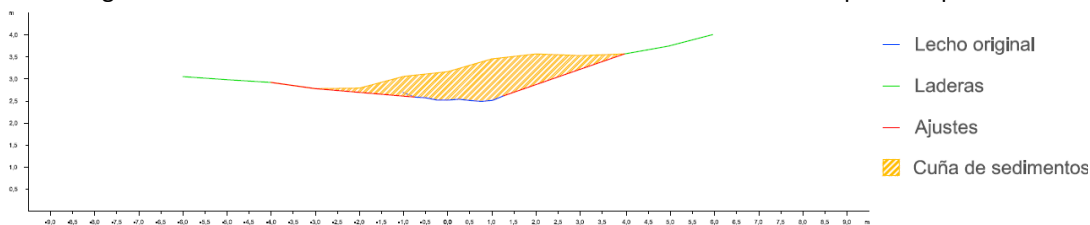


Figura A2.188. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 39

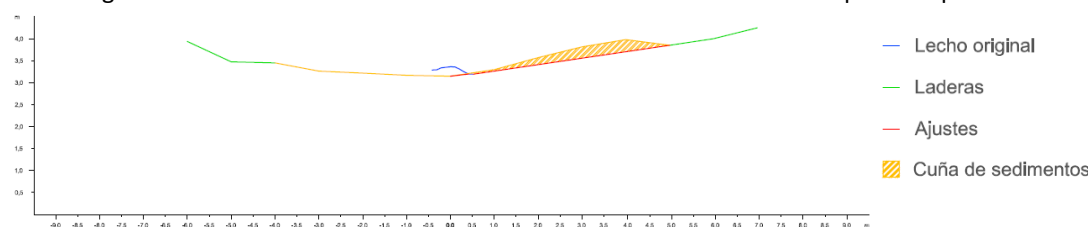


Figura A2.189. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 39

Dique 40

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 40 (Tabla A2.38) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.190 a A2.192).

Tabla A2.38. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 40

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	9,6269	11,1181	1	10,6137	5,9648
2		1,4912		3		
2	2,0	1,4912	1,8201	2	1,4502	1,0196
3		0,3289		Fin cuña		
3	1,1	0,3289	0,1809	Opción 1	10,7946	6,1457
Fin cuña		0,0000		Opción 2	12,5683	12,1377
Volumen total			13,1191		11,6815	9,1417
Errores			A ₁ = 1,4376		A ₂ = -2,5398	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

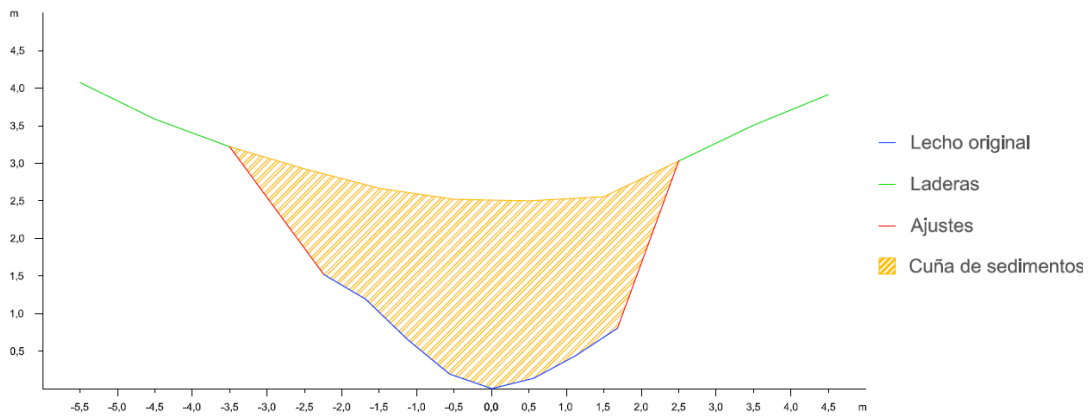


Figura A2.190. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 40

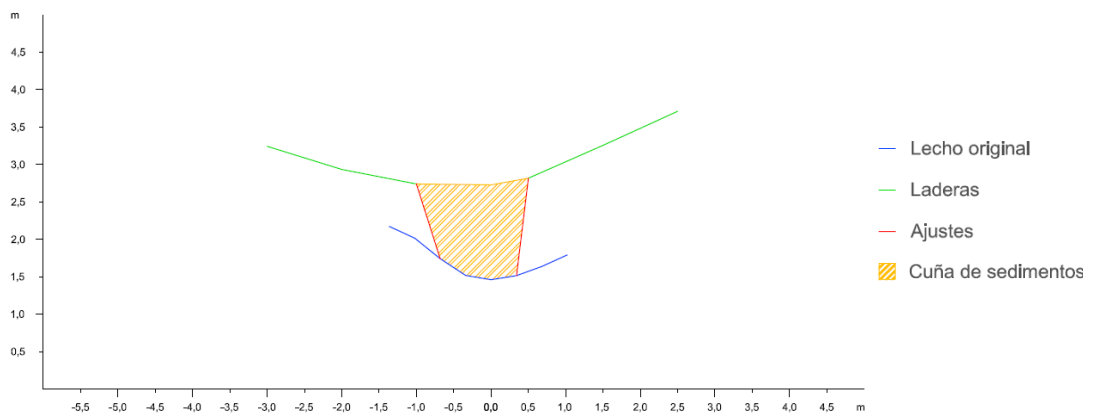


Figura A2.191. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 40

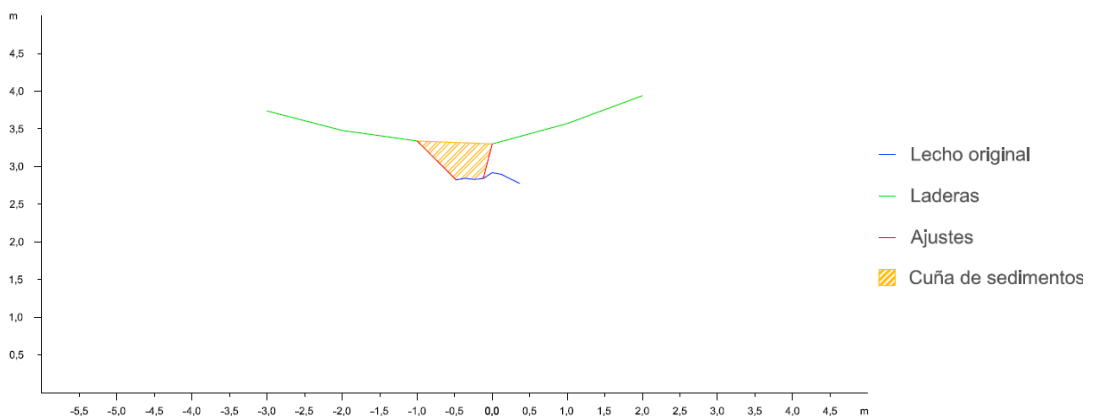


Figura A2.192. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 40

Dique 41

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 41 (Tabla A2.39) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.193 a A2.196).



Tabla A2.39. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 41

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	10,0862	14,6668	1	19,8671	18,3224
2		4,5806		3		
2	2,0	4,5806	5,9727	2	6,8659	5,5684
3		1,3921		4		
3	2,0	1,3921	1,5420	3	1,0622	0,4797
4		0,1499		Fin cuña		
4	1,20	0,1499	0,0899	Opción 1	20,9294	18,8021
Fin cuña		0,0000		Opción 2	21,6227	20,3251
Volumen total			22,2714		21,2760	19,5636
Errores			A ₁ = 0,9954		A ₂ = -1,7124	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

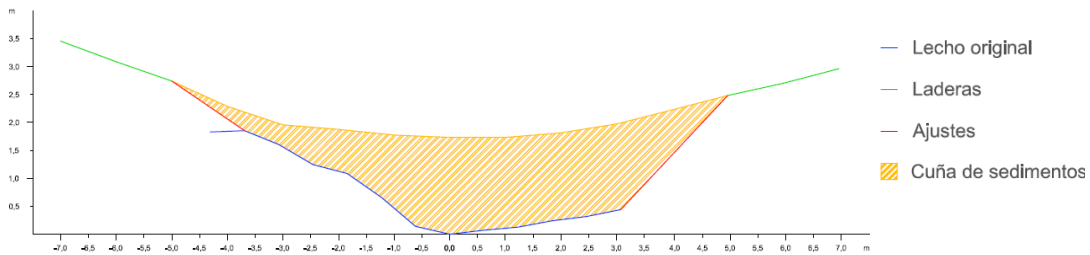


Figura A2.193. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 41

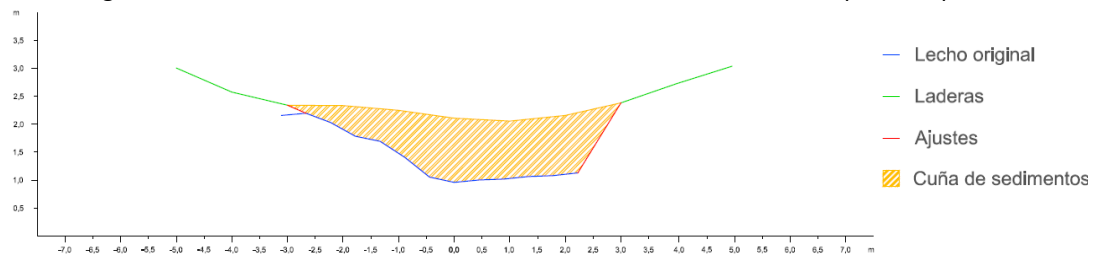


Figura A2.194. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 41

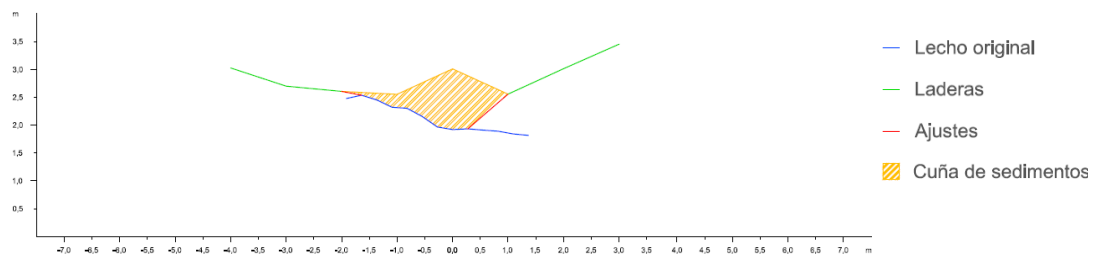


Figura A2.195. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 41

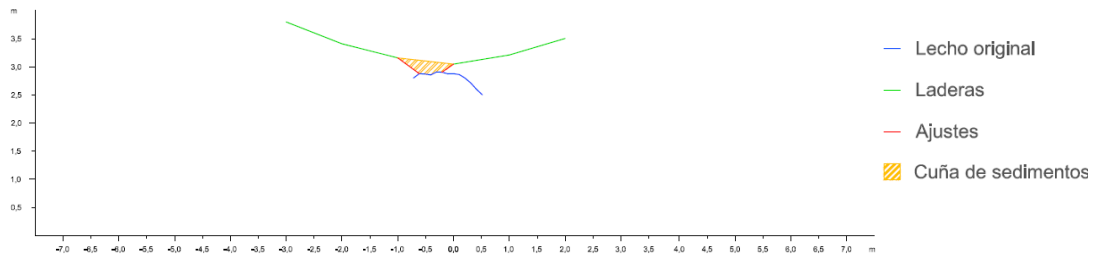


Figura A2.196. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 41

Dique 42

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 42 (Tabla A2.40) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.197 a A2.199).

Tabla A2.40. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 42

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,8476	1,3495	1	1,8383	1,7026
2		0,8513		3		
2	1,0	0,8513	0,5567	2	0,6078	0,5030
3		0,2620		Fin cuña		
3	0,92	0,2620	0,1205	Opción 1	1,9588	1,8231
Fin cuña		0,0000		Opción 2	1,9572	1,8525
Volumen total			2,02662		1,9580	1,8378
Errores			A ₁ = 0,0686		A ₂ = -0,1202	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

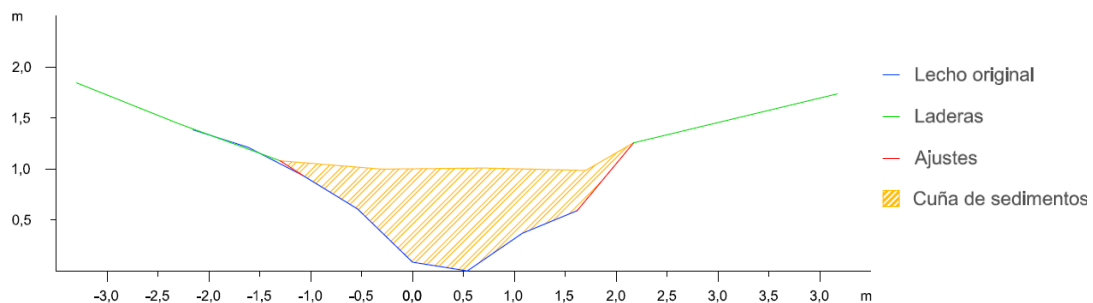


Figura A2.197. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 42

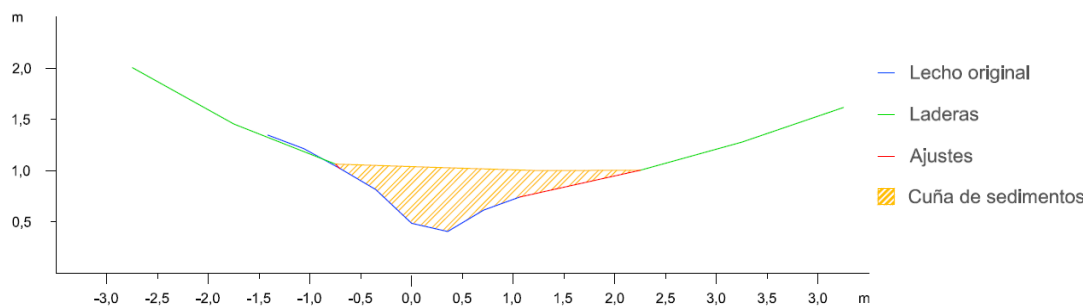


Figura A2.198. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 42

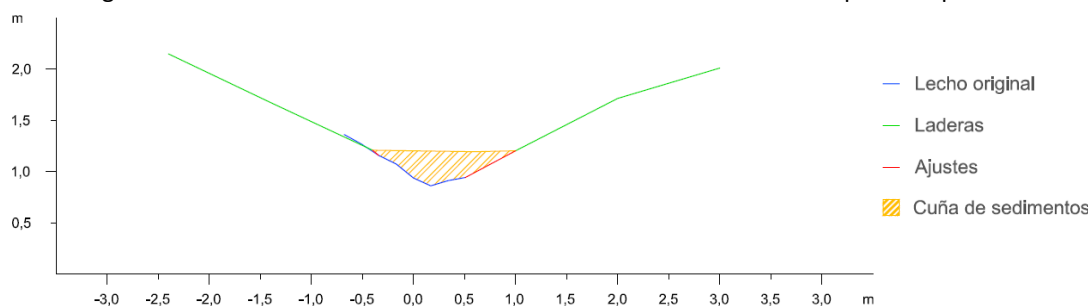


Figura A2.199. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 42

Dique 43

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 43 (Tabla A2.41) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.200 a A2.203).

Tabla A2.41. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 43

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	4,1186	7,5413	1	7,9044	5,4534
2		0,9089		3		
2	3,0	0,9089	1,5887	2	1,6307	0,9012
3		0,1502		4		
3	3,0	0,1502	0,4068	3	0,5285	0,6050
4		0,1210		Fin cuña		
4	2,00	0,1210	0,1210	Opción 1	8,4329	6,0584
Fin cuña		0,0000		Opción 2	9,2930	8,5635
Volumen total			9,6577		8,8629	7,3109
Errores			A ₁ = 0,7948		A ₂ = -1,5520	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

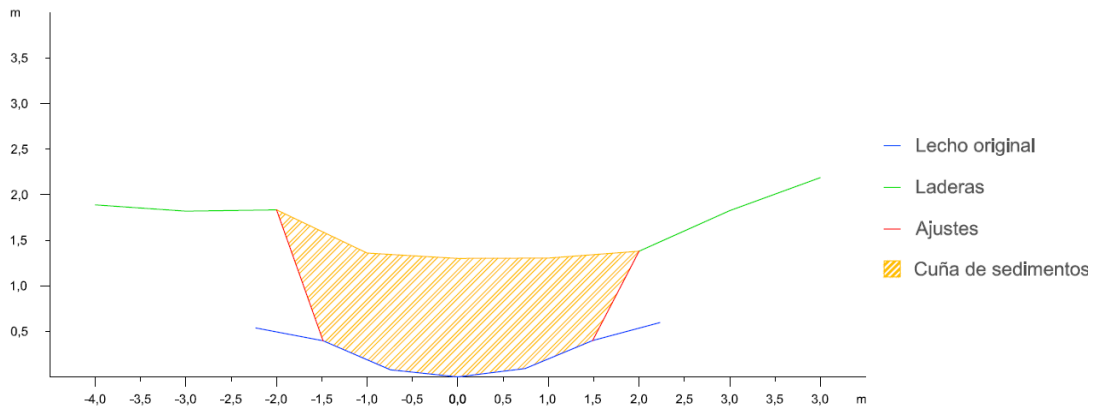


Figura A2.200. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 43

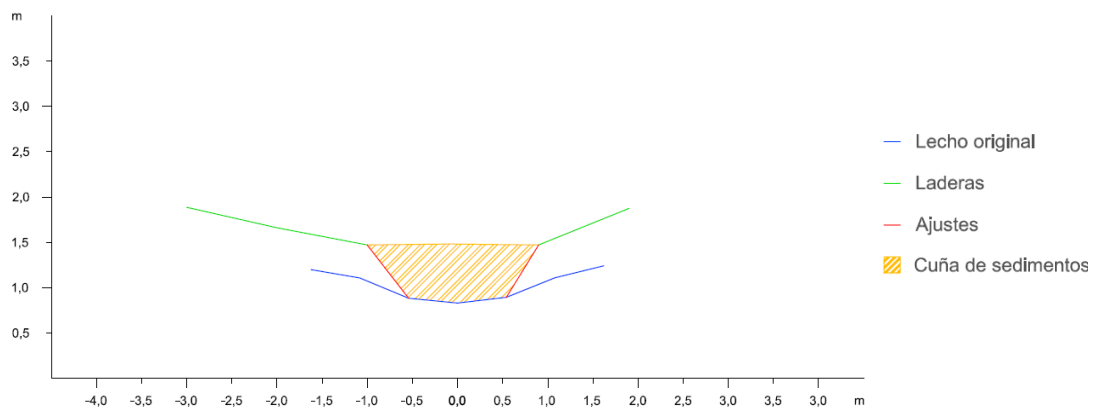


Figura A2.201. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 43

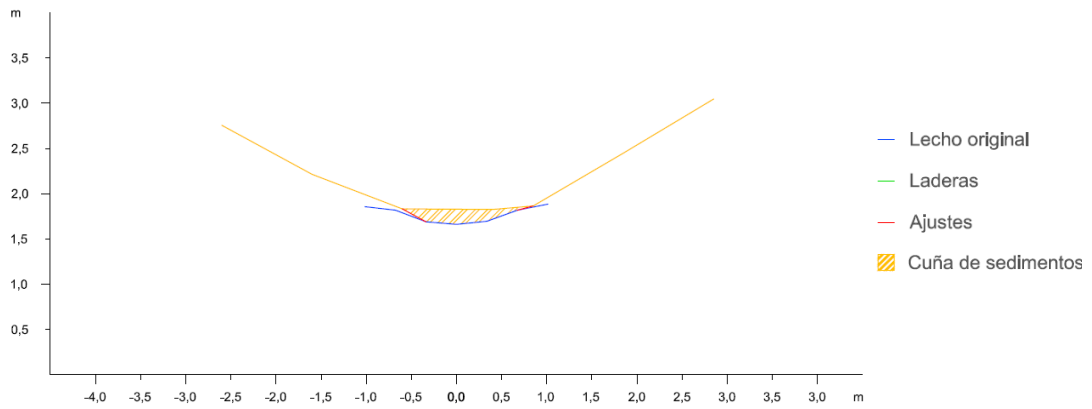


Figura A2.202. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 43

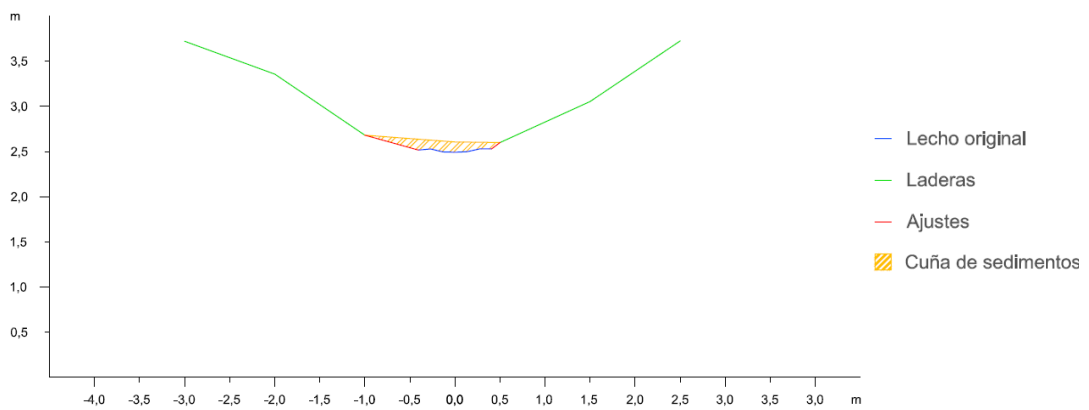


Figura A2.203. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 43

Dique 44

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 44 (Tabla A2.42) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.204 a A2.207).

Tabla A2.42. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 44

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	5,4340	11,1492	1	13,9043	11,9928
2		1,9988		3		
2	3,0	1,9988	3,7109	2	3,9229	2,8506
3		0,4751		4		
3	3,0	0,4751	0,7482	3	0,4654	0,1161
4		0,0237		Fin cuña		
4	1,90	0,0237	0,0225	Opción 1	14,3697	12,1089
Fin cuña		0,0000		Opción 2	15,0946	14,0223
Volumen total			15,6308		14,7322	13,0656
Errores			A ₁ = 0,8986		A ₂ = -1,6665	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

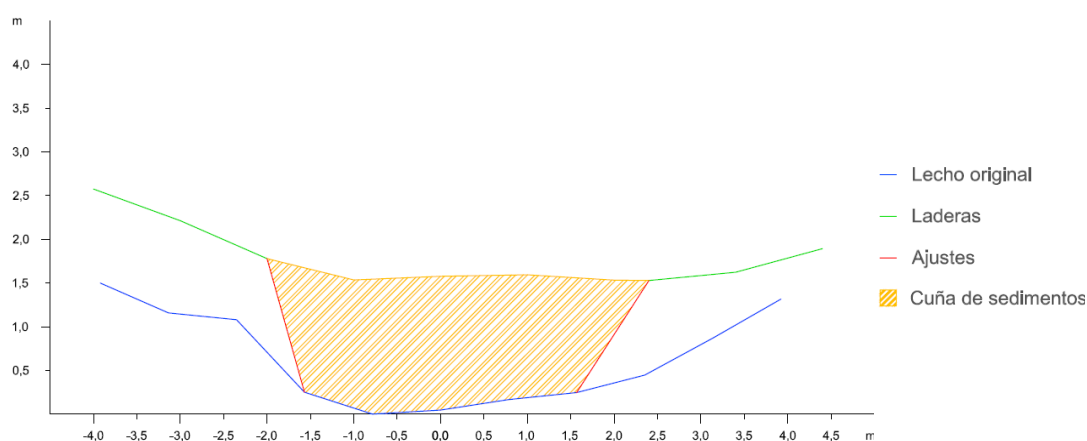


Figura A2.204. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 44

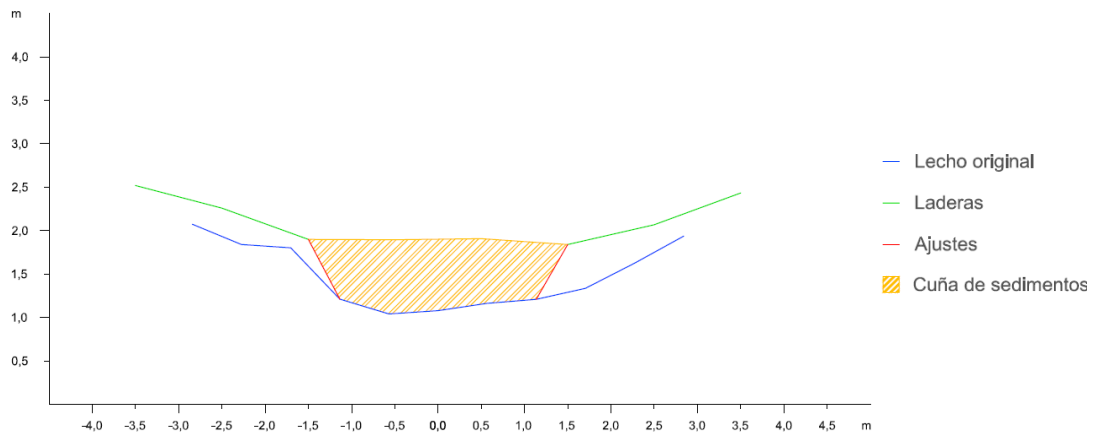


Figura A2.205. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 44

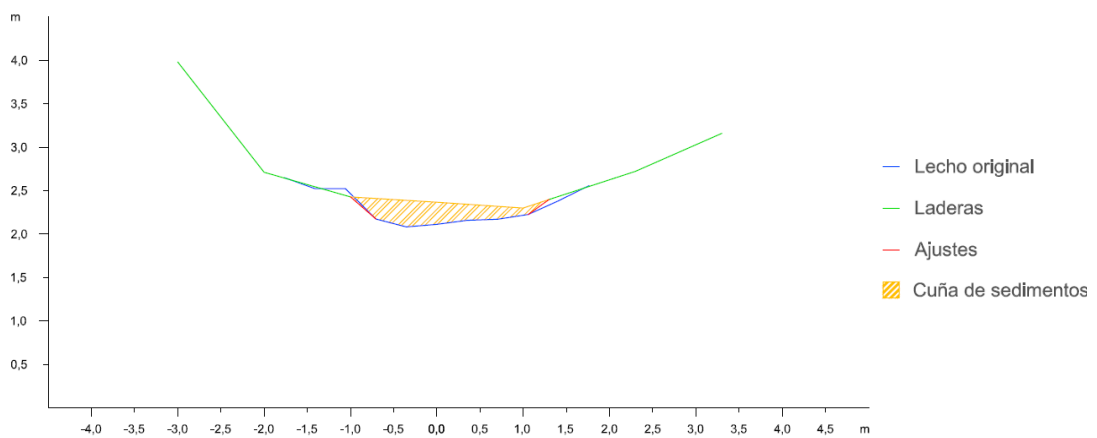


Figura A2.206. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 44

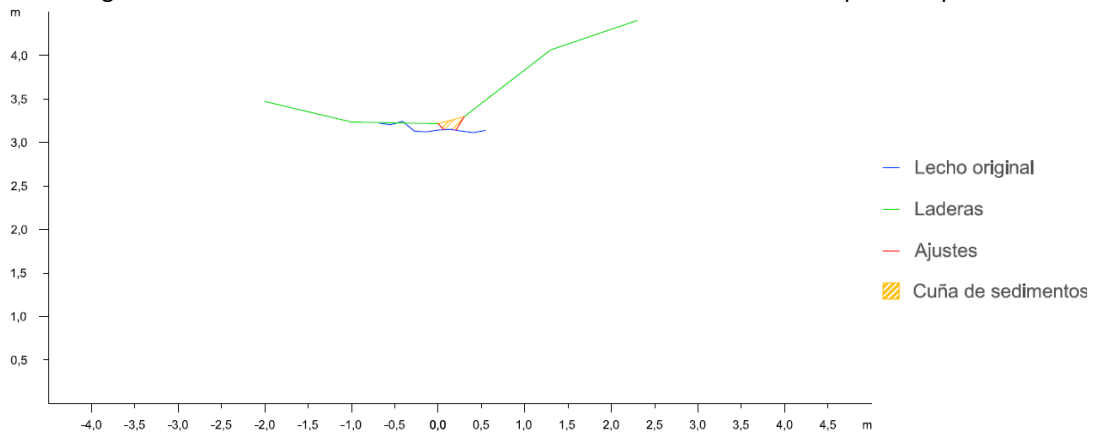


Figura A2.207. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 44

Dique 45

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 45 (Tabla A2.43) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.208 a A2.211).



Tabla A2.43. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 45

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	17,8073	29,8606	1	46,3200	48,2132
2		12,0533		3		
2	2,0	12,0533	15,5128	2	17,2867	13,8380
3		3,4595		4		
3	2,0	3,4595	3,4982	3	1,3252	0,0851
4		0,0387		Fin cuña		
4	0,20	0,0387	0,0039	Opción 1	47,6452	48,2983
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			48,8755		47,3982	46,0004
Errores			A₁= 1,4773		A₂= -1,3978	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

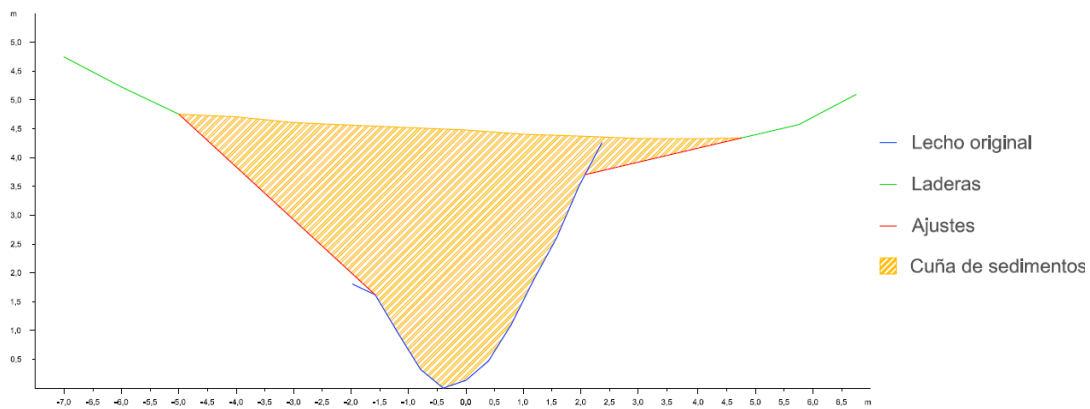


Figura A2.208. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 45

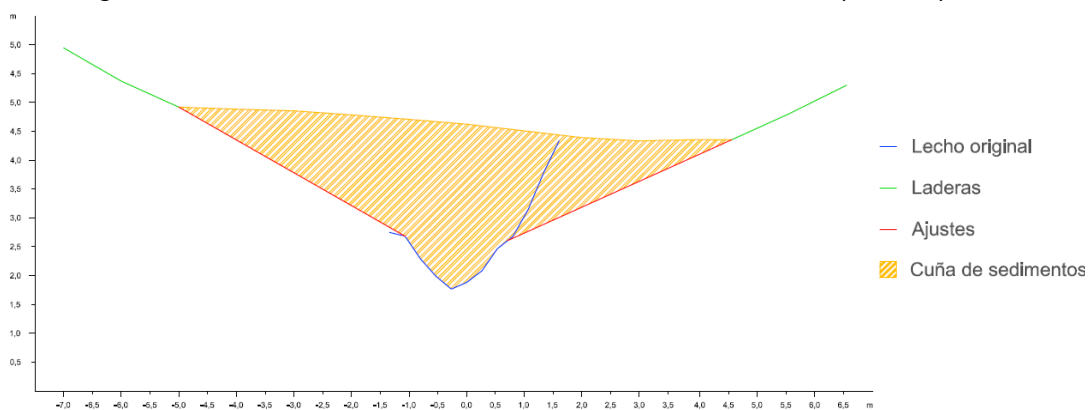


Figura A2.209. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 45

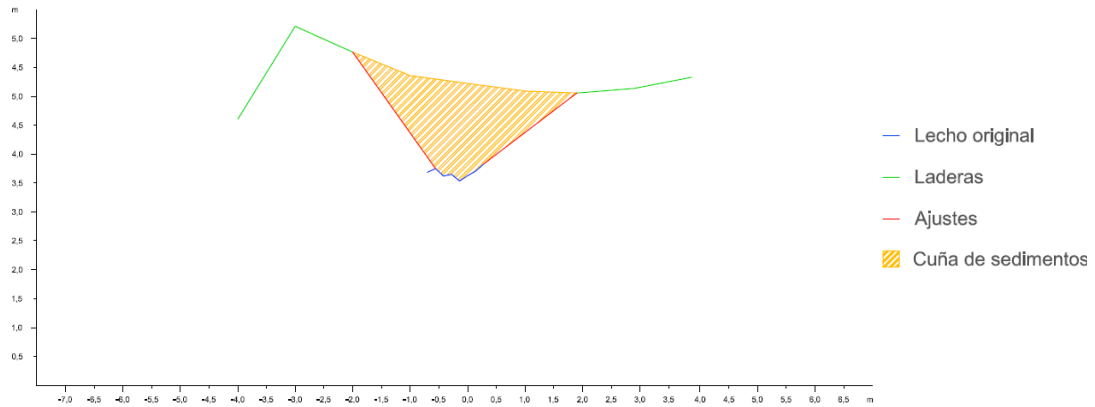


Figura A2.210. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 45

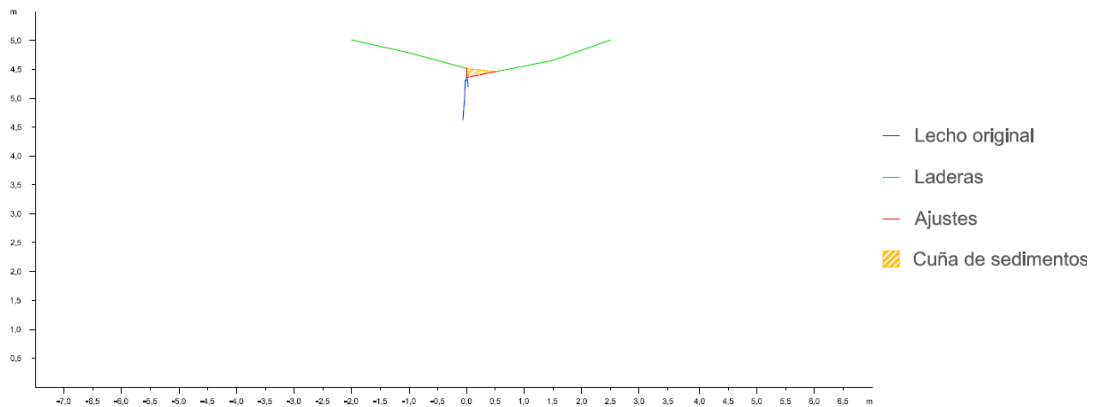


Figura A2.211. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 45

Dique 46

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 46 (Tabla A2.44) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.212 a A2.216).

Tabla A2.44. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 46

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		6,7980		1		
2	1,0	1,1488	3,9734	3	4,0892	2,2976
2		1,1488		2		
3	1,0	0,8743	1,0116	4	1,7299	1,7486
3		0,8743		3		
4	1,0	0,5436	0,7090	5	1,1836	1,0872
4		0,5436		4		
5	1,0	0,5021	0,5229	Fin cuña	0,8507	1,0042
5		0,5021		Opción 1	5,5238	3,6359
Fin cuña	1,0	0,0000	0,2511	Opción 2	6,5539	6,7262
Volumen total			6,4678		6,0389	5,1810
Errores			A ₁ = 0,4289		A ₂ = -0,8578	



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

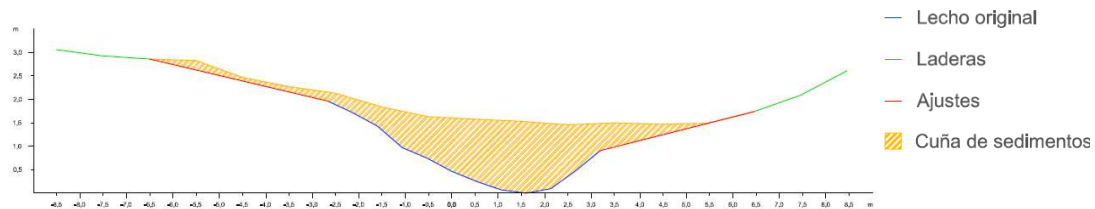


Figura A2.212. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 46

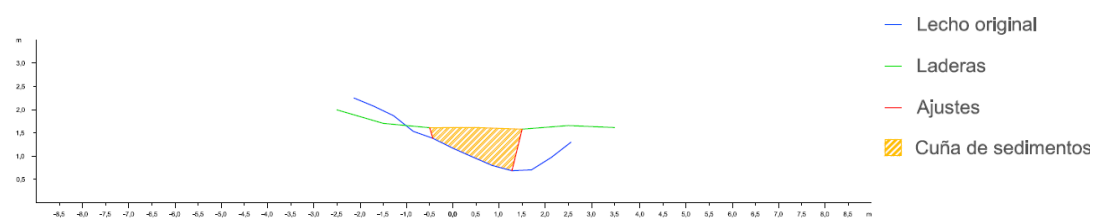


Figura A2.213. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 46

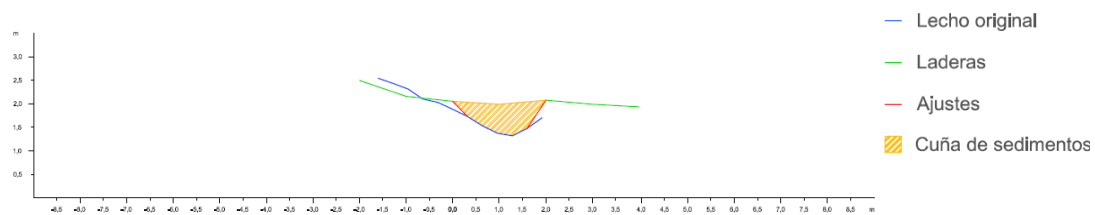


Figura A2.214. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 46

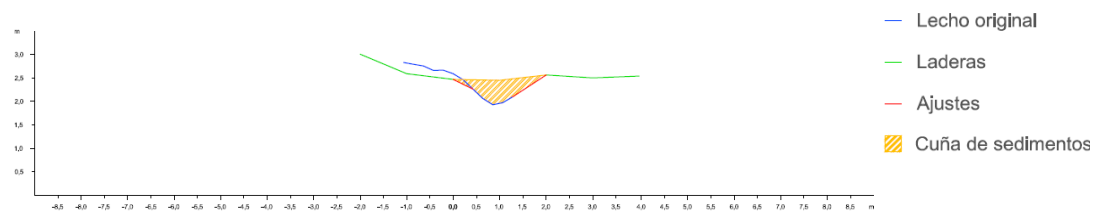


Figura A2.215. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 46

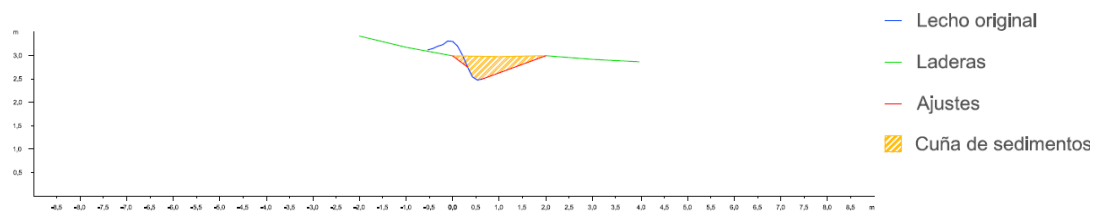


Figura A2.216. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 46

Dique 47

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 47 (Tabla A2.45) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la

cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.217 a A2.219).

Tabla A2.45. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 47

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	21,2451	32,8632	1	47,6851	46,4724
2		11,6181		3		
2	2,0	11,6181	15,4283	2	17,0106	14,4788
3		3,8102		Fin cuña		
3	1,80	3,8102	3,4292	Opción 1	51,1143	49,9016
Fin cuña		0,0000		Opción 2	49,8738	47,3420
Volumen total			51,72068		50,4941	48,6218
Errores			A ₁ = 1,2266		A ₂ = -1,8723	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

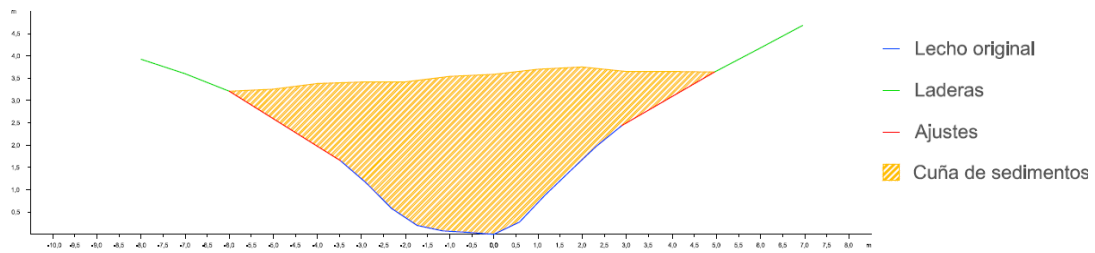


Figura A2.217. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 47

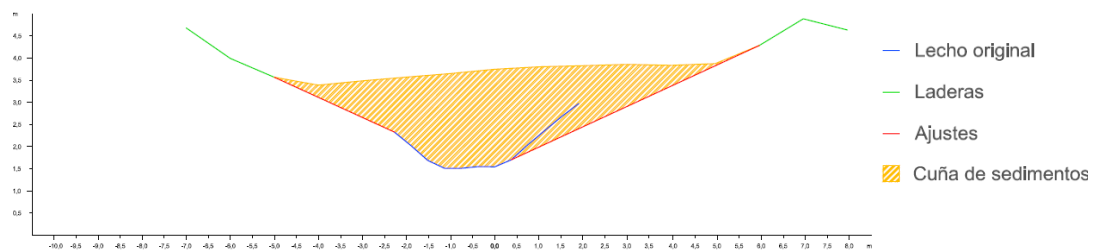


Figura A2.218. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 47

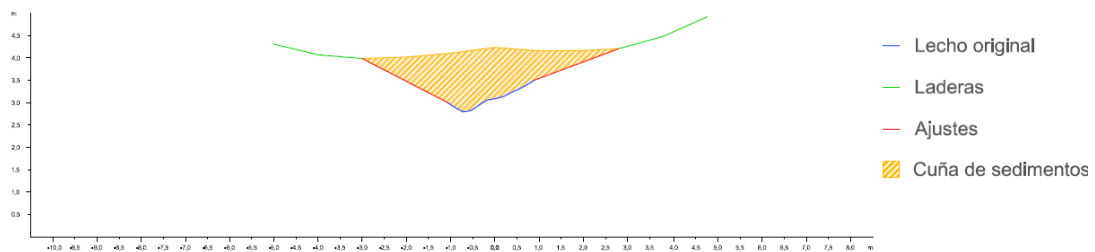


Figura A2.219. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 47

Dique 48

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 48 (Tabla A2.46) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.220 a A2.223).

Tabla A2.46. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 48

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	4,3081	6,1601	1	8,3217	7,4080
2		1,8520		3		
2	2,0	1,8520	2,6184	2	3,3328	3,0656
3		0,7664		4		
3	2,0	0,7664	0,8480	3	0,4918	0,2203
4		0,0816		Fin cuña		
4	0,70	0,0816	0,0286	Opción 1	8,8134	7,6283
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			9,6551		9,1674	8,4413
Errores			A ₁ = 0,4876	A ₂ = -0,7262		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

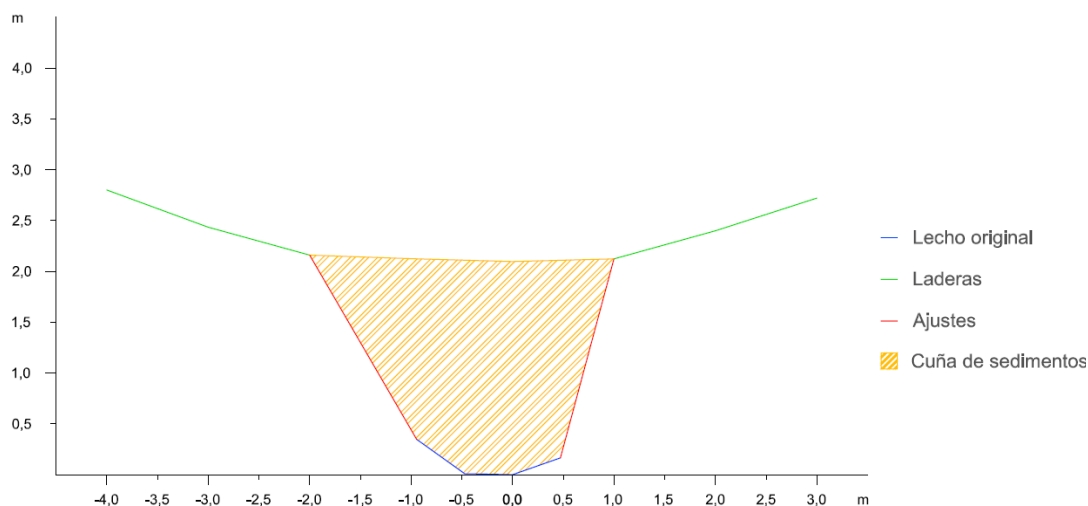


Figura A2.220. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 48

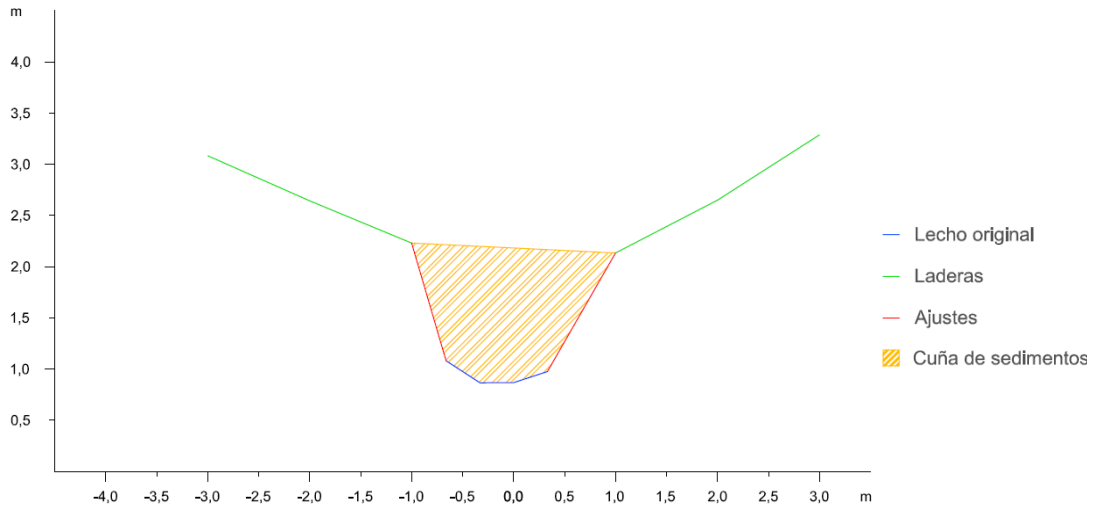


Figura A2.221. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 48

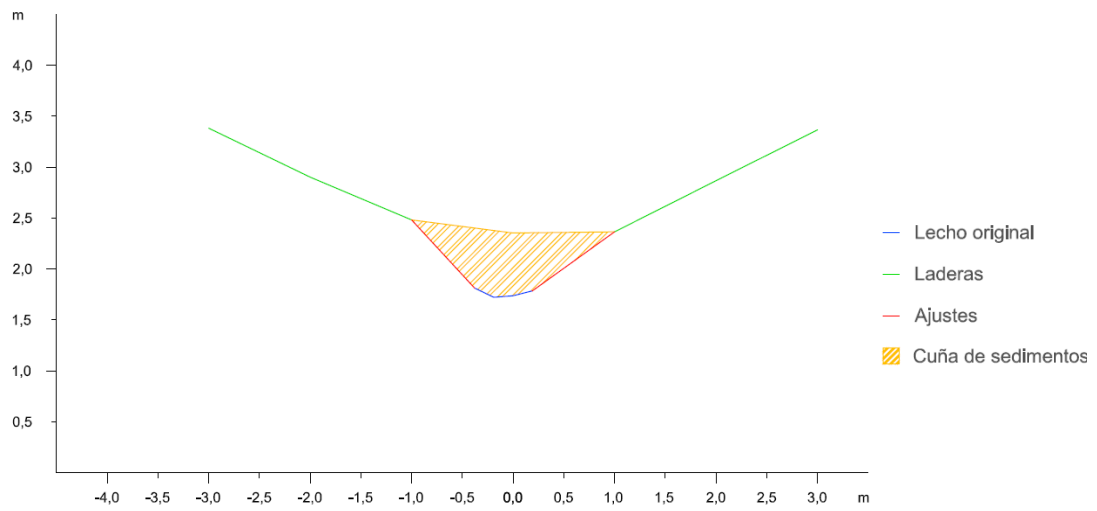


Figura A2.222. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 48

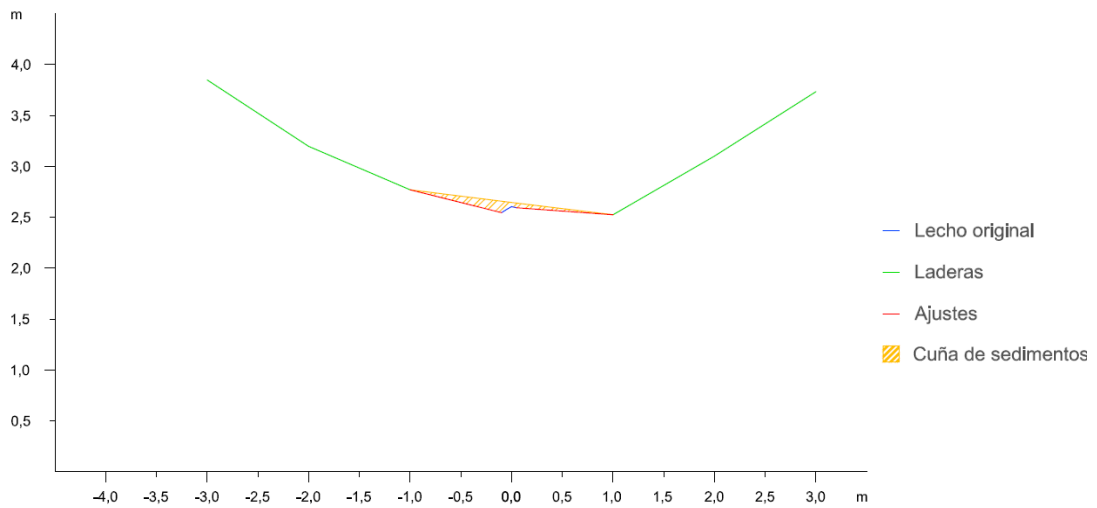


Figura A2.223. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 48



Dique 49

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 49 (Tabla A2.47) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.224 a A2.226).

Tabla A2.47. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 49

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	20,5081	16,5333	1	23,9386	25,1170
2		12,5585		3		
2	1,0	12,5585	6,8161	2	6,1794	2,3619
3		1,0736		Fin cuña		
3	1,20	1,0736	0,6442	Opción 1	24,5827	25,7612
Fin cuña		0,0000		Opción 2	22,7127	18,8952
Volumen total			23,99351		23,6477	22,3282
Errores			A ₁ = 0,3458		A ₂ = -1,3195	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

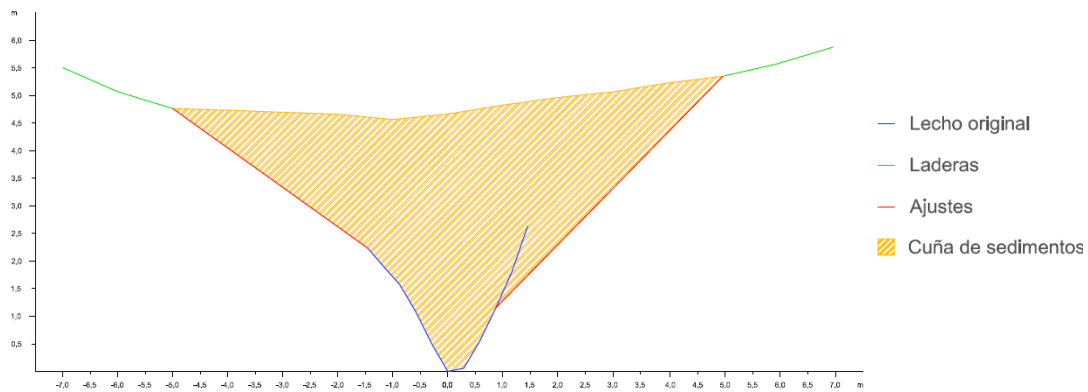


Figura A2.224. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 49

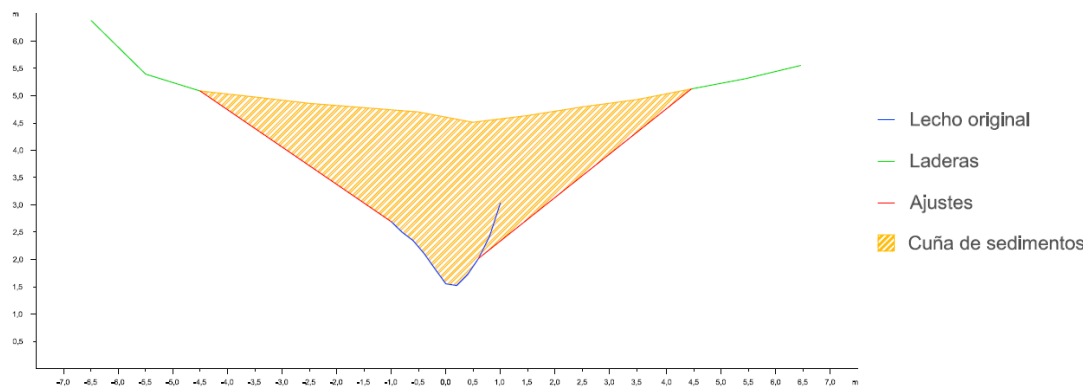


Figura A2.225. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 49

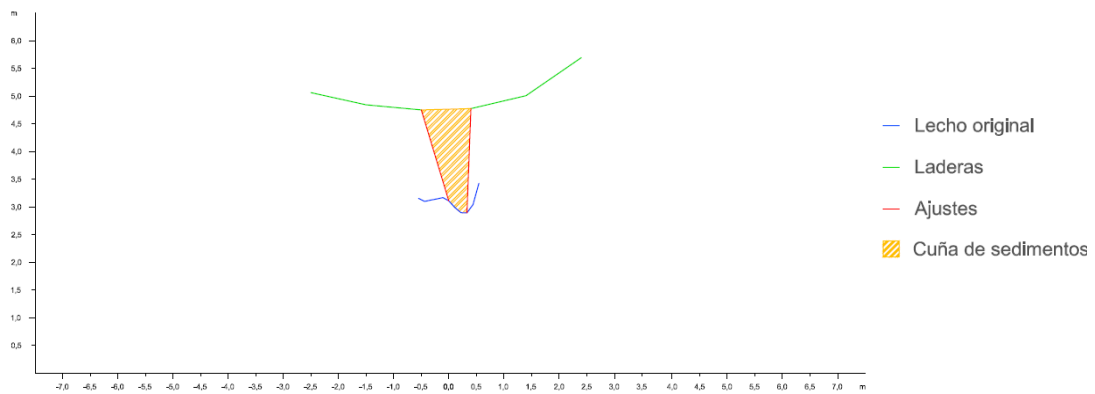


Figura A2.226. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 49

Dique 50

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 50 (Tabla A2.48) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.227 a A2.229).

Tabla A2.48. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 50

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	6,1646	4,7684	1	6,8402	6,7444
2		3,3722		3		
2	1,0	3,3722	2,1197	2	2,2802	1,7342
3		0,8671		Fin cuña		
3	1,00	0,8671	0,4336	Opción 1	7,2737	7,1780
Fin cuña		0,0000		Opción 2	7,0486	6,5026
Volumen total			7,3216		7,1612	6,8403
Errores			A ₁ = 0,1604		A ₂ = -0,3209	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

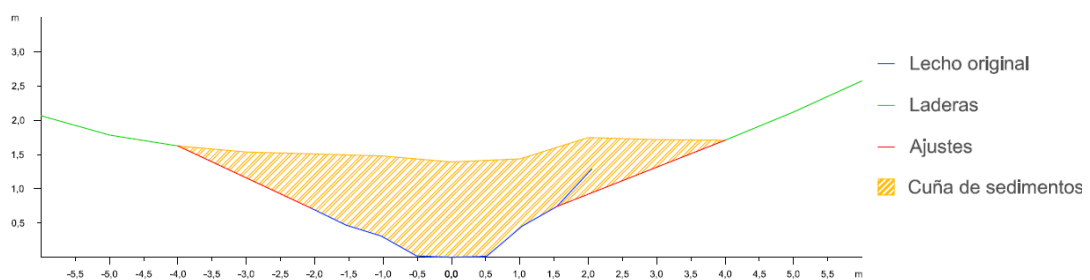


Figura A2.227. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 50

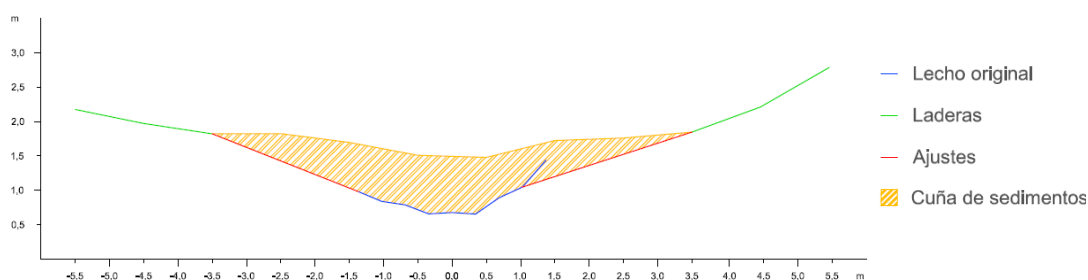


Figura A2.228. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 50

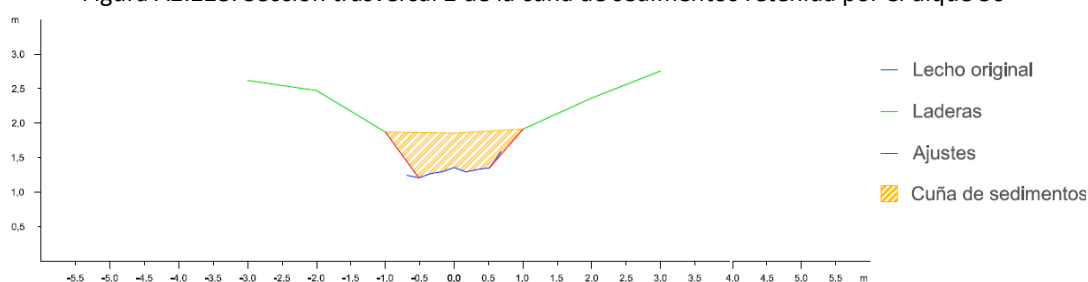


Figura A2.229. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 50

Dique 51

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 51 (Tabla A2.49) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.230 a A2.233).

Tabla A2.49. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 51

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	6,7578	9,5244	1	12,7666	11,0664
2		2,7666		3		
2	2,0	2,7666	4,0923	2	5,4321	5,3028
3		1,3257		4		
3	2,0	1,3257	1,4045	3	0,6017	0,1734
4		0,0788		Fin cuña		
4	0,20	0,0788	0,0079	Opción 1	13,3683	11,2398
Fin cuña		0,0000		Opción 2	14,9644	14,8351
Volumen total			15,0291		14,1663	13,0374
Errores			A ₁ = 0,8627		A ₂ = -1,1289	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

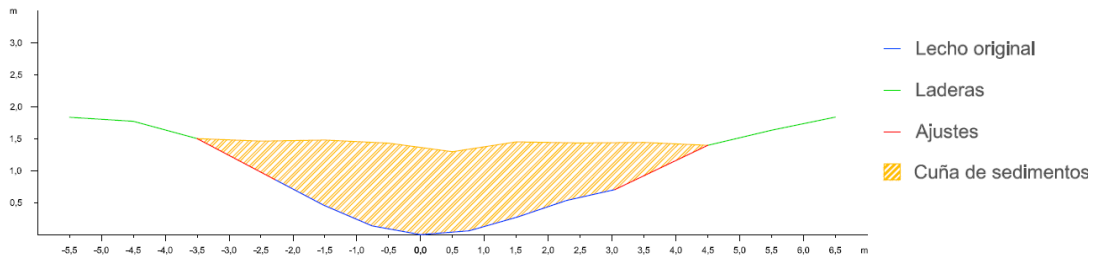


Figura A2.230. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 51

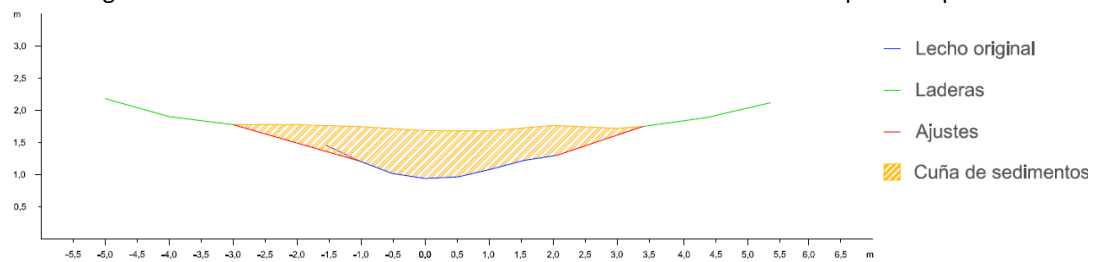


Figura A2.231. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 51

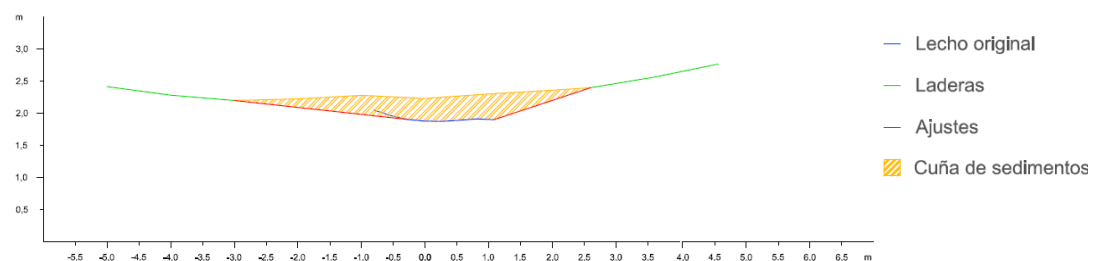


Figura A2.232. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 51

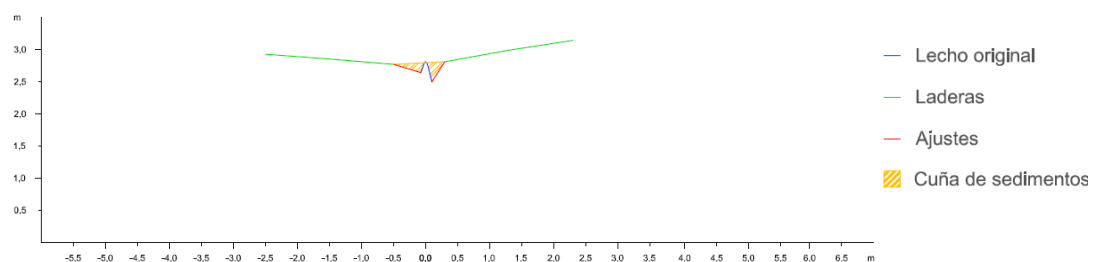


Figura A2.233. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 51

Dique 52

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 52 (Tabla A2.50) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.234 a A2.237).



Tabla A2.50. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 52

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	10,9579	16,0739	1	22,2644	20,4640
2		5,1160		3		
2	2,0	5,1160	7,0907	2	9,0855	7,8988
3		1,9747		4		
3	2,0	1,9747	2,5882	3	1,9929	1,6565
4		0,6135		Fin cuña		
4	0,70	0,6135	0,2147	Opción 1	24,2573	22,1205
Fin cuña		0,0000		Opción 2	25,3742	24,1874
Volumen total			25,9675		24,8157	23,1539
Errores			A₁= 1,1518		A₂= -1,6618	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

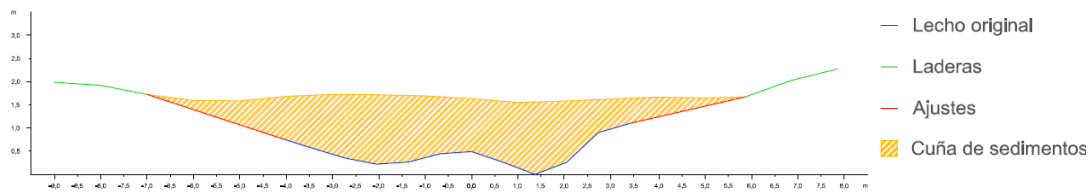


Figura A2.234. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 52

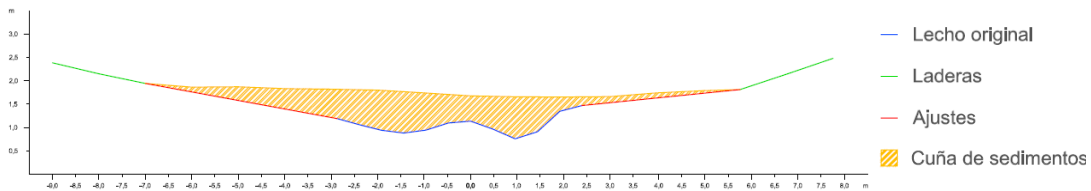


Figura A2.235. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 52

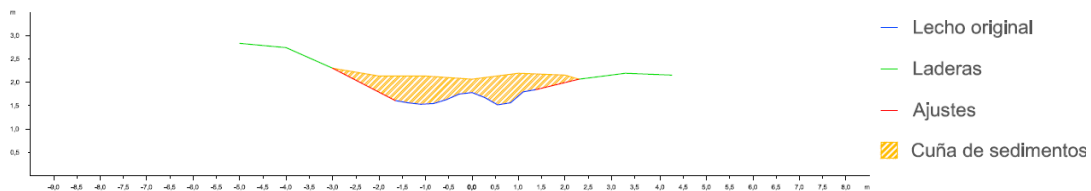


Figura A2.236. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 52

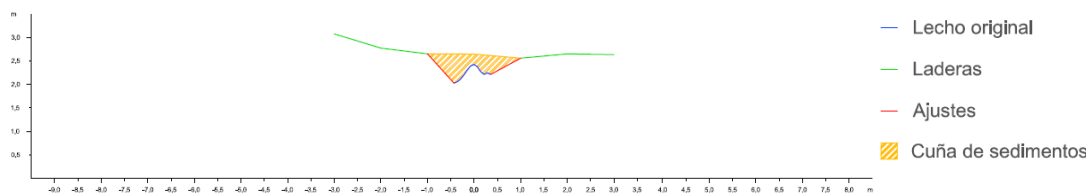


Figura A2.237. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 52

Dique 54

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 54 (Tabla A2.51) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.238 a A2.240).

Tabla A2.51. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 54

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,9760	1,4005	1	1,9345	1,6498
2		0,8249		3		
2	1,0	0,8249	0,6764	2	1,4681	1,5834
3		0,5278		Fin cuña		
3	2,00	0,5278	0,5278	Opción 1	2,4623	2,1776
Fin cuña		0,0000		Opción 2	2,8685	2,9839
Volumen total			2,6046		2,6654	2,5807
Errores			A ₁ = -0,0608		A ₂ = -0,0847	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

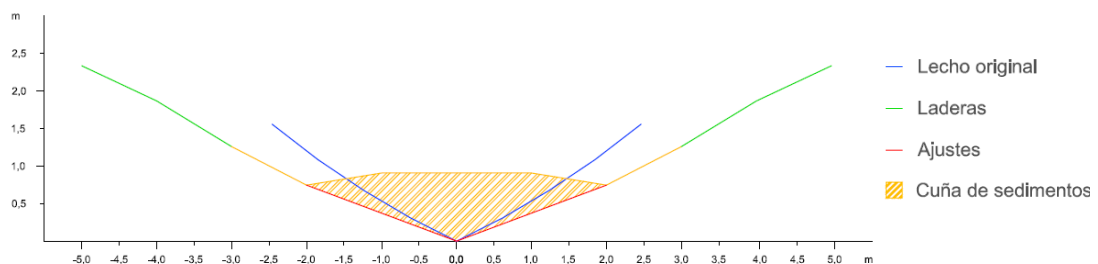


Figura A2.238. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 54

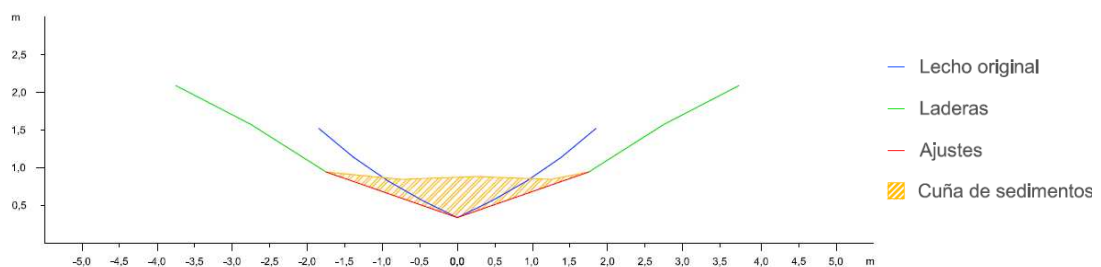


Figura A2.239. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 54

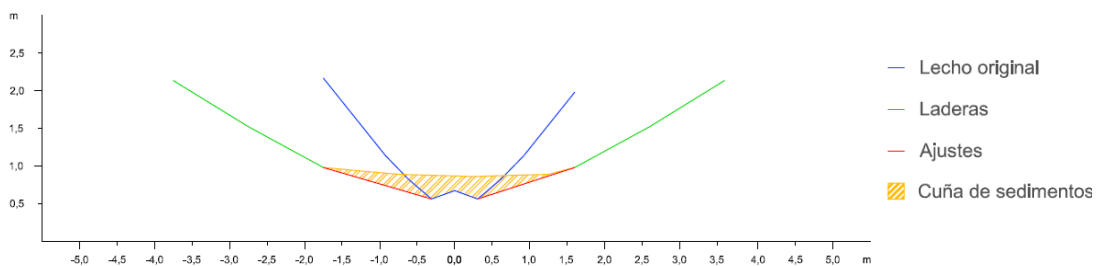


Figura A2.240. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 54

Dique 55

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 55 (Tabla A2.52) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.241 a A2.246).

Tabla A2.52. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	4,0	10,3621	26,4502	1	31,2103	22,9040
2		2,8630		3		
2	4,0	2,8630	8,9132	2	14,9916	12,7488
3		1,5936		4		
3	4,0	1,5936	7,1998	3	18,7196	16,0504
4		2,0063		5		
4	4,0	2,0063	12,8544	4	30,8735	35,3672
5		4,4209		6		
5	4,0	4,4209	15,7722	5	17,3676	19,7516
6		3,4652		Fin cuña		
6	1,7	3,4652	2,9454	Opción 1	67,2975	58,7060
Fin		0,0000		Opción 2		
Volumen total			74,1352		71,2791	68,1088
Errores			A ₁ = 2,8561	A ₂ = -3,1703		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

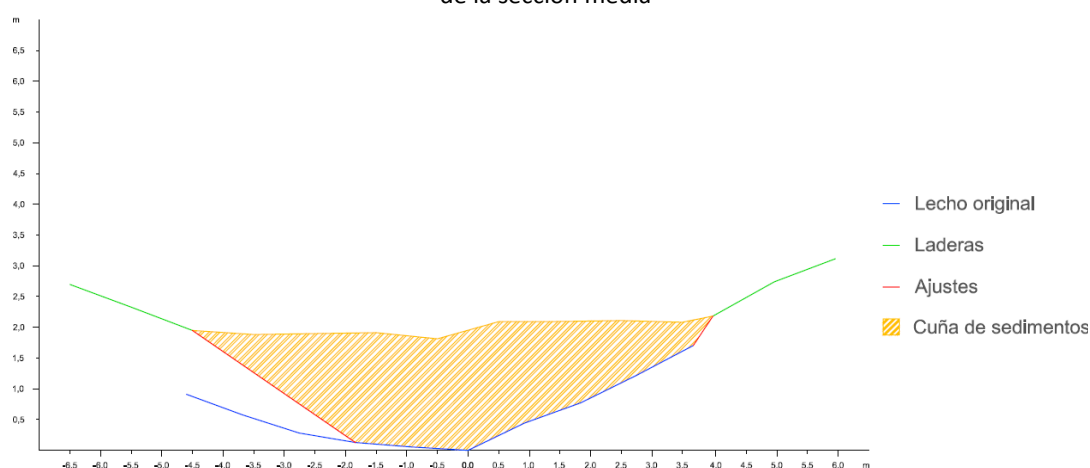


Figura A2.241. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

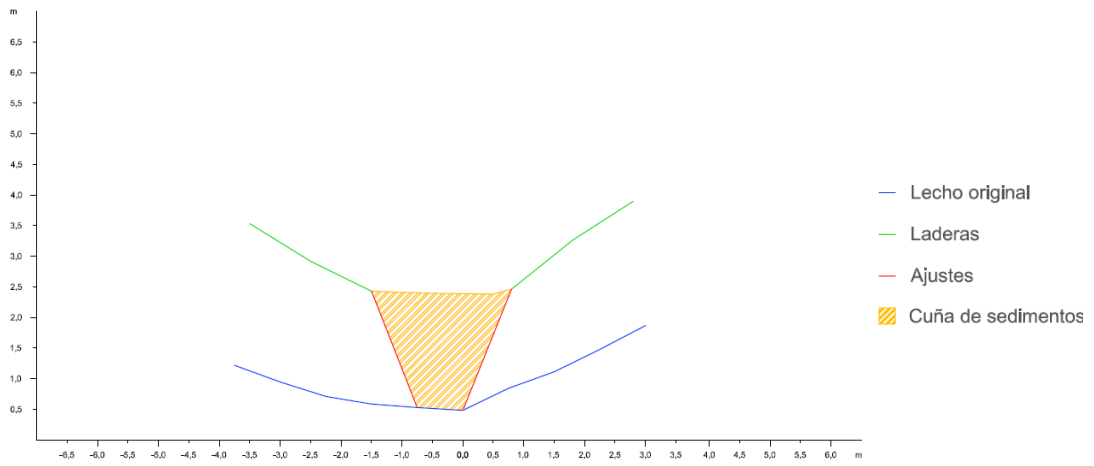


Figura A2.242. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

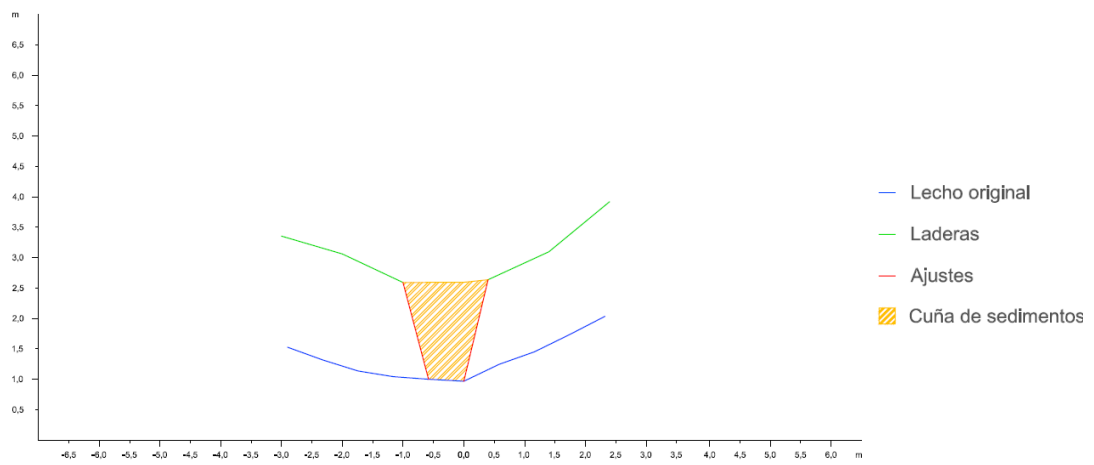


Figura A2.243. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

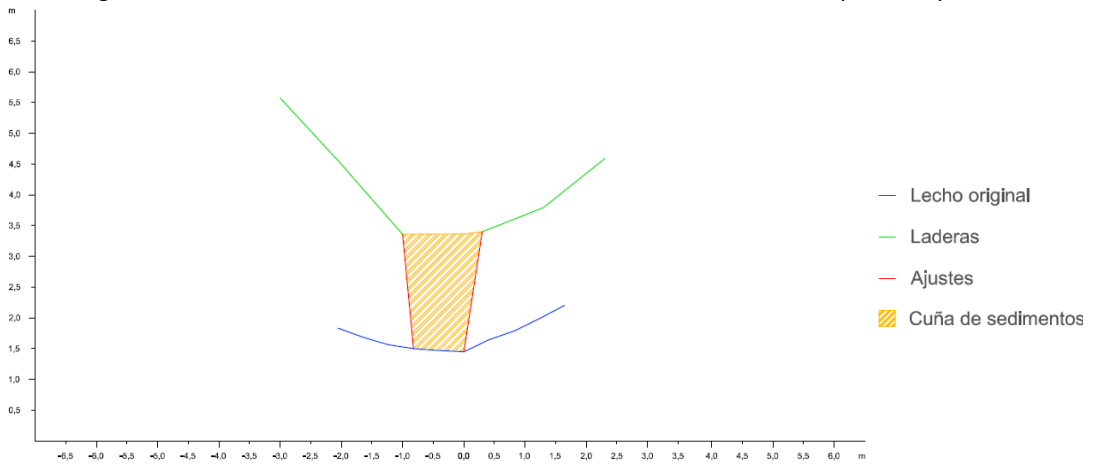


Figura A2.244. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

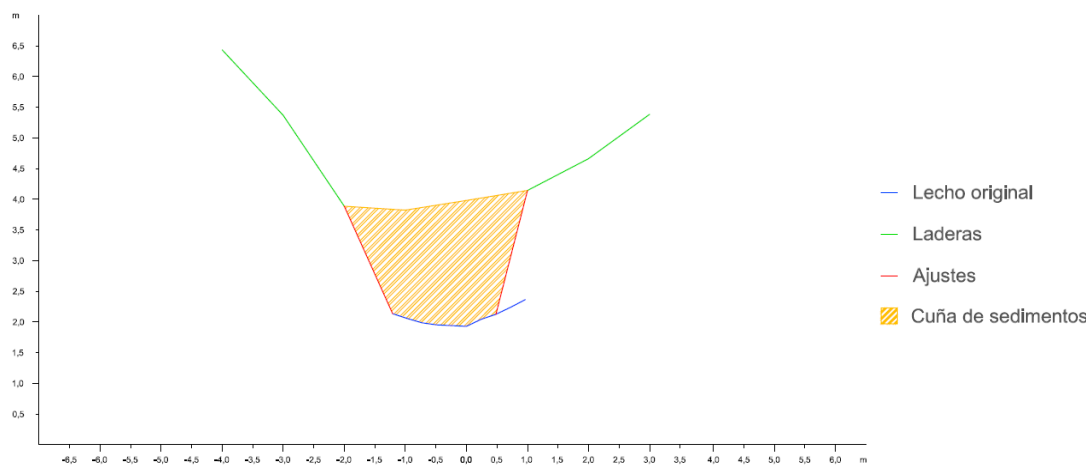


Figura A2.245. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

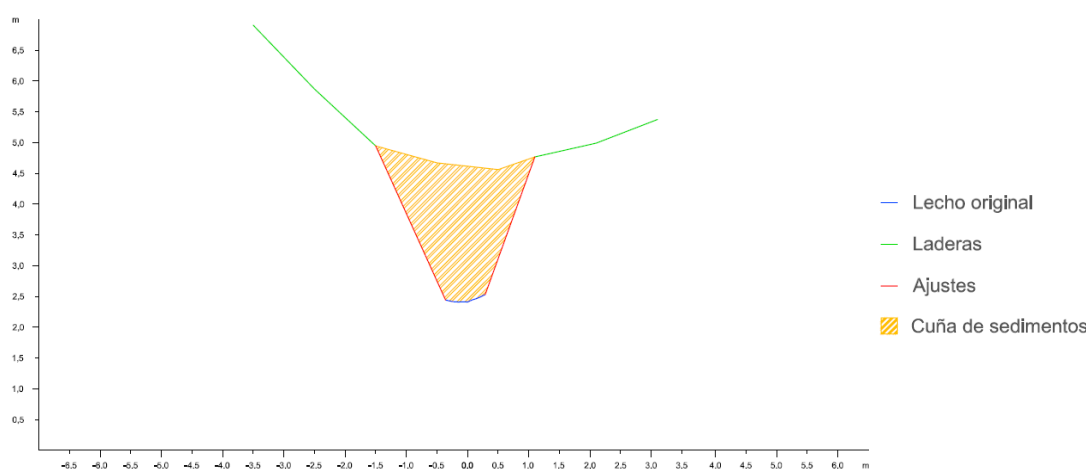


Figura A2.246. Sección trasversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 55

Dique 56

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 56 (Tabla A2.53) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.247 a A2.249).

Tabla A2.53. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 56

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	5,2134	7,7168	1	10,7603	10,0136
2		2,5034		3		
2	2,0	2,5034	3,4168	2	3,2837	2,9229
3		0,9134		Fin cuña		
3	1,20	0,9134	0,5480	Opción 1	11,3083	10,5616
Fin cuña		0,0000		Opción 2	11,0005	10,6397
Volumen total			11,68164		11,1544	10,6007
Errores			A ₁ = 0,5272		A ₂ = -0,5538	

V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

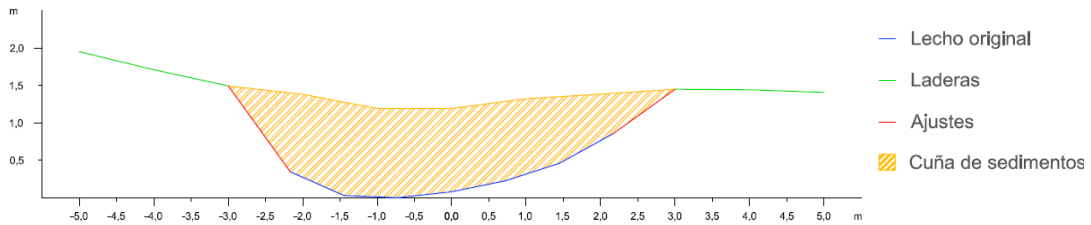


Figura A2.247. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 56

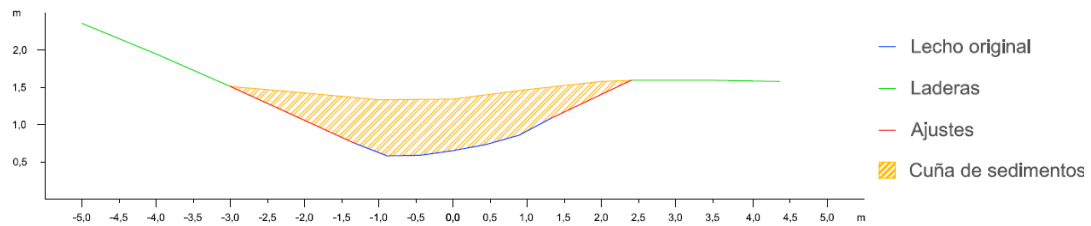


Figura A2.248. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 56

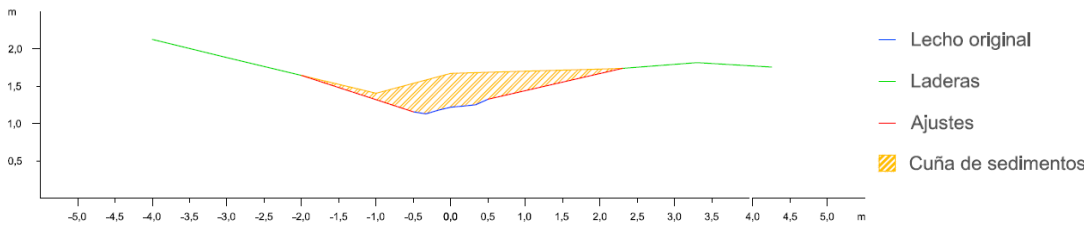


Figura A2.249. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 56

Dique 57

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 57 (Tabla A2.54) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.250 a A2.253).

Tabla A2.54. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 57

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V_{MSE} (m ³)	Sección	V_p (m ³)	V_{SM} (m ³)
1	3,0	16,6108	34,0475	1	42,4507	36,5250
2		6,0875		3		
2	3,0	6,0875	11,3661	2	12,4592	8,9394
3		1,4899		4		
3	3,0	1,4899	2,8530	3	2,3537	1,8545
4		0,4121		Fin cuña		
4	1,50	0,4121	0,3091	Opción 1	44,8044	38,3795
Fin cuña		0,0000		Opción 2	46,8157	43,2959
Volumen total			48,5756		45,8101	40,8377
Errores			$A_1 = 2,7656$		$A_2 = -4,9724$	



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

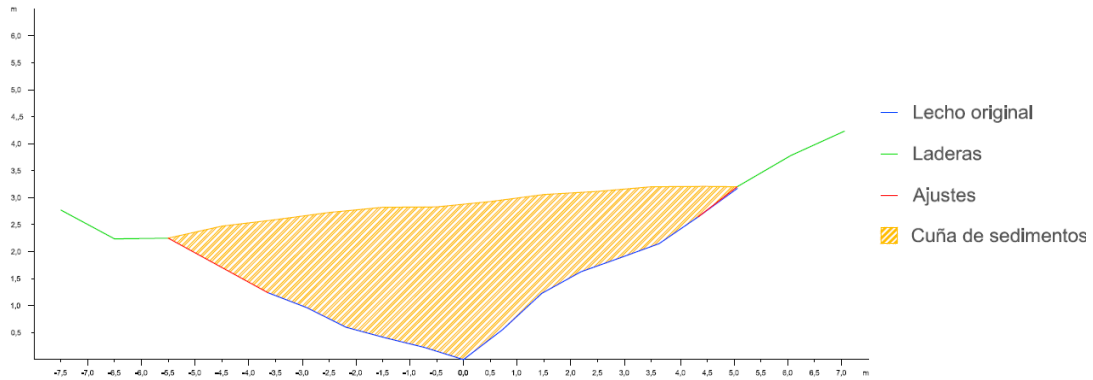


Figura A2.250. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 57

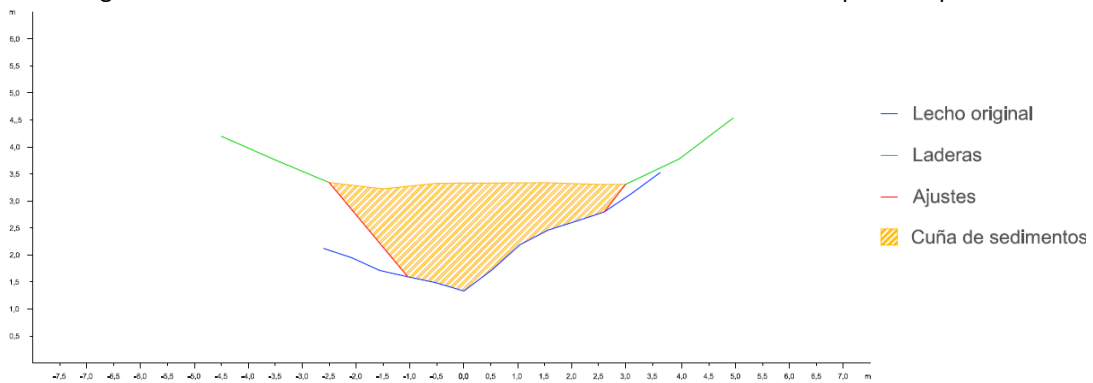


Figura A2.251. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 57

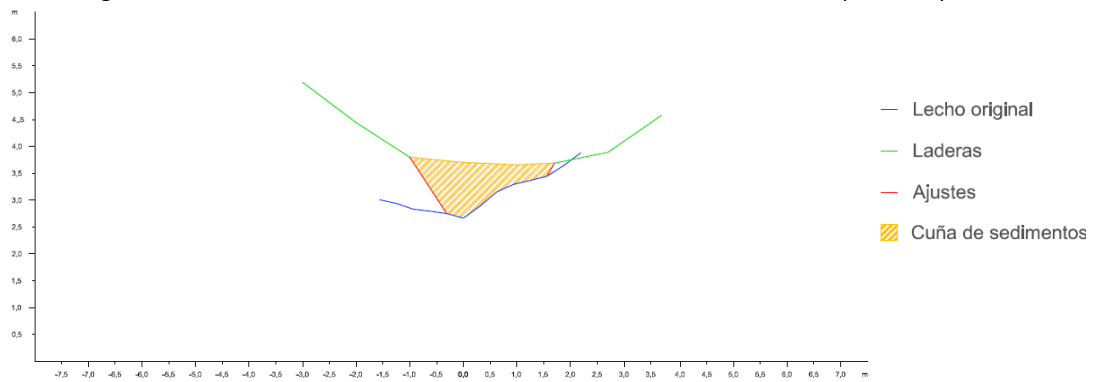


Figura A2.252. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 57

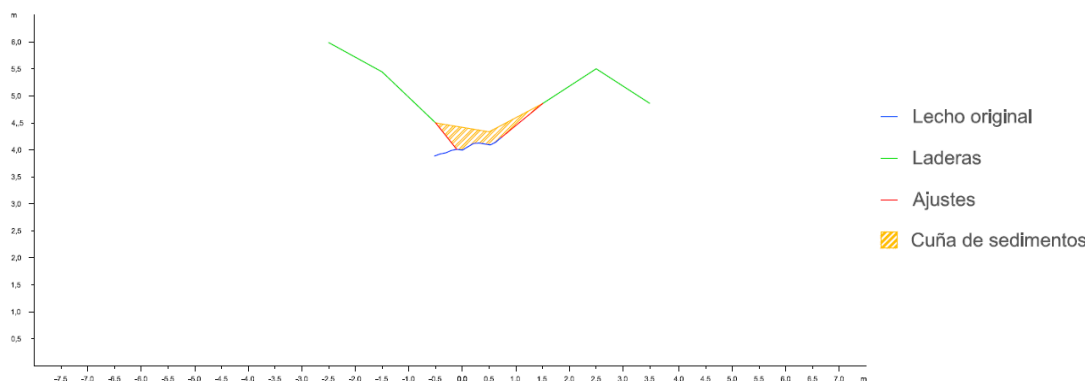


Figura A2.253. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 57

Dique 59

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 59 (Tabla A2.55) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.254 a A2.256).

Tabla A2.55. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 59

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,9811	1,3831	1	1,7658	1,5700
2		0,7850		2		
2	1,0	0,7850	0,4807	2	1,8451	1,6493
3		0,1763		Fin cuña		
3	0,90	0,1763	0,0793	Opción 1	1,8500	1,6837
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			1,943035			
Errores			A ₁ = 0,0930			A ₂ = -0,1664

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

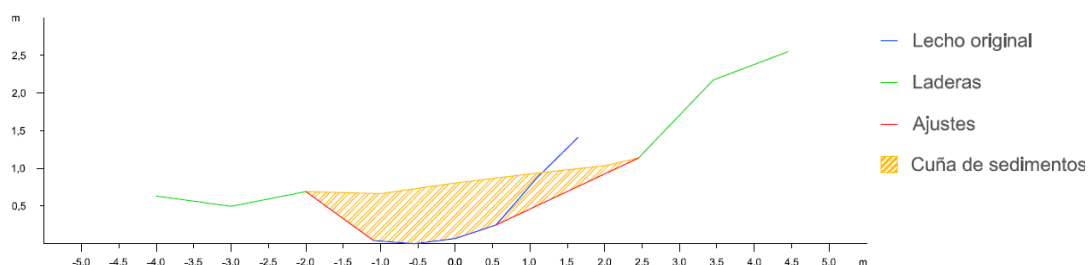


Figura A2.254. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 59

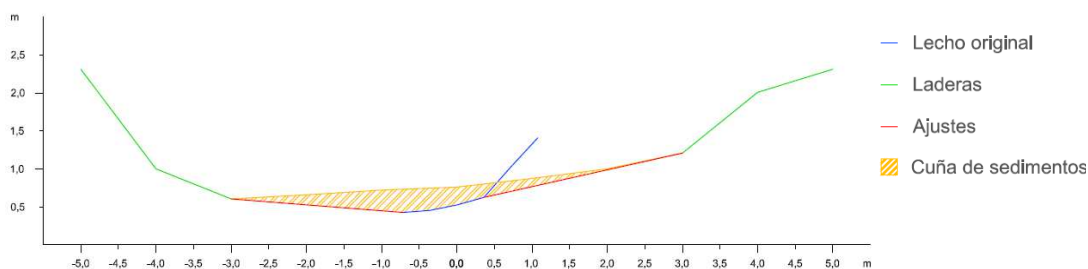


Figura A2.255. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 59

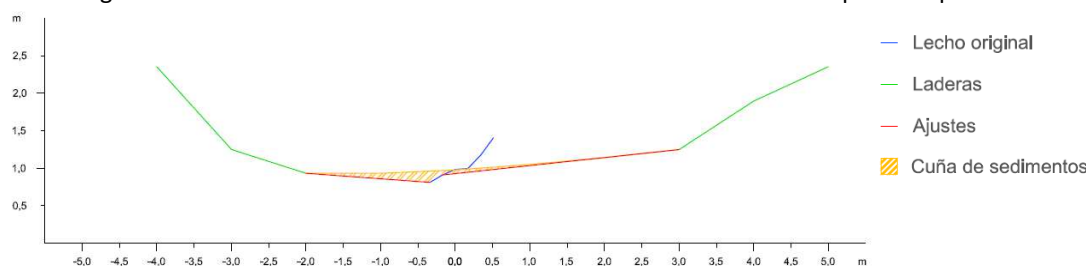


Figura A2.256. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 59

Dique 61

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 61 (Tabla A2.56) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.257 a A2.260).

Tabla A2.56. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 61

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,8823	5,0488	1	6,2462	4,6660
2		1,1665		3		
2	2,0	1,1665	1,9875	2	3,1680	3,2840
3		0,8210		4		
3	2,0	0,8210	1,1225	3	1,2162	1,0854
4		0,3015		Fin cuña		
4	1,60	0,3015	0,2412	Opción 1	7,4624	5,7514
Fin cuña		0,0000		Opción 2	8,4580	8,5740
Volumen total			8,4000		7,9602	7,1627
Errores			A ₁ = 0,4398		A ₂ = -0,7975	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

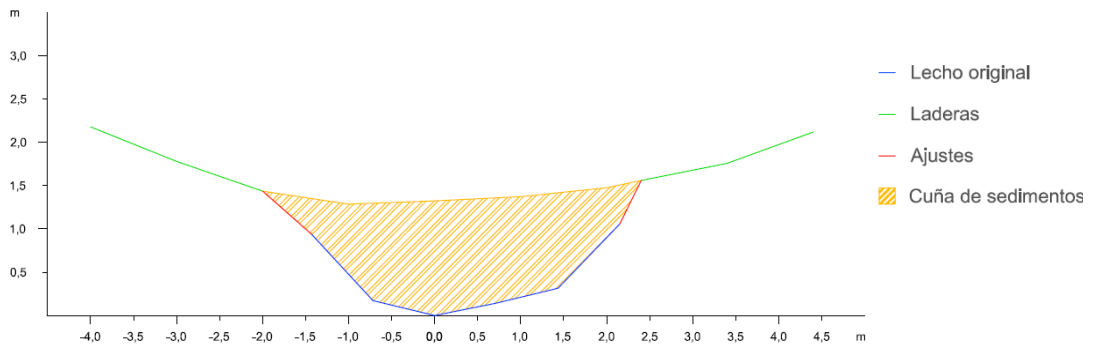


Figura A2.257. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 61

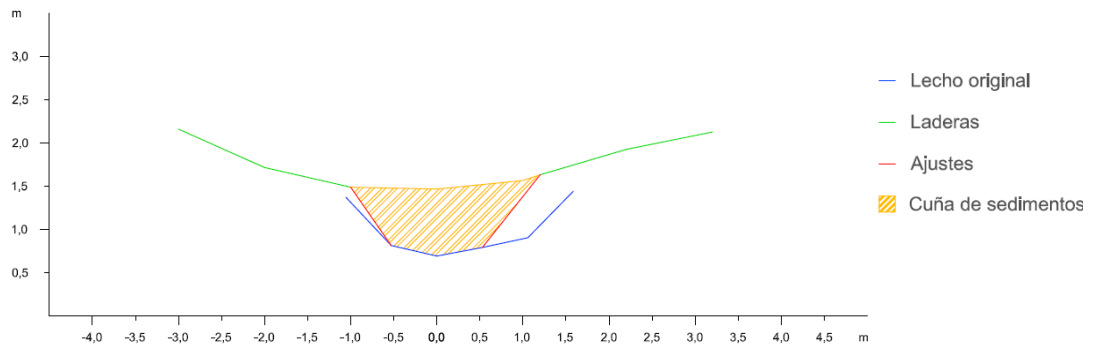


Figura A2.258. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 61

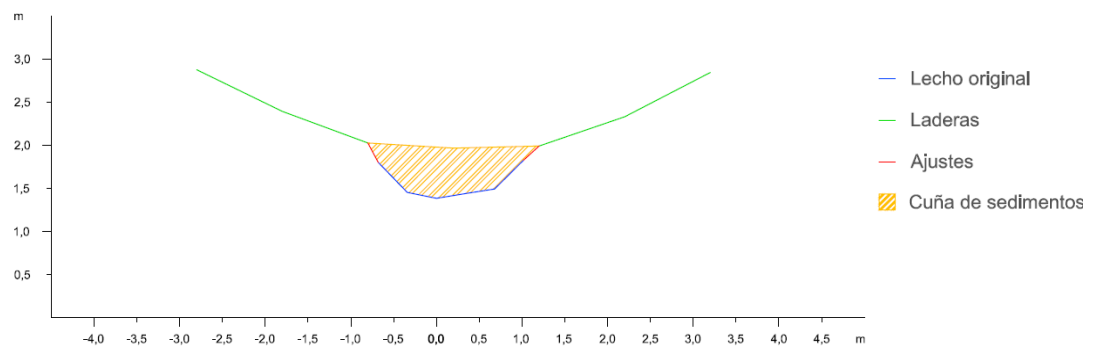


Figura A2.259. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 61

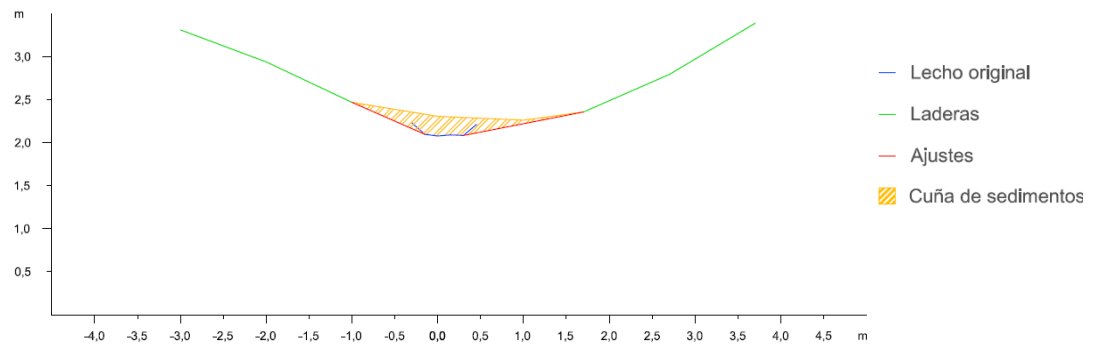


Figura A2.260. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 61

Dique 62

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 62 (Tabla A2.57) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.261 a A2.271).



Tabla A2.57. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3	18,9883	51,7247	1	93,2618	92,9688
2		15,4948		3		
2	3	15,4948	41,6837	2	73,9821	73,7658
3		12,2943		4		
3	3	12,2943	32,4066	3	55,9921	55,8606
4		9,3101		5		
4	3	9,3101	23,6513	4	39,3088	38,7444
5		6,4574		6		
5	3	6,4574	15,9398	5	25,7233	25,0146
6		4,1691		7		
6	3	4,1691	10,1379	6	15,4735	15,5370
7		2,5895		8		
7	3	2,5895	5,3039	7	7,3478	5,6784
8		0,9464		9		
8	3	0,9464	2,8787	8	5,2663	5,8362
9		0,9727		10		
9	3	0,9727	2,1027	9	2,8721	2,5746
10		0,4291		11		
10	3	0,4291	0,9182	10	0,0000	0,0000
11		0,1830		Fin cuña		
11	3	0,9727	2,1027	Opción 1	185,2886	182,1885
Fin cuña		0,4291		Opción 2	186,7650	186,6177
Volumen total			0,9182		186,0268	184,4031
Errores			A₁= 0,8119		A₂= -1,6237	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

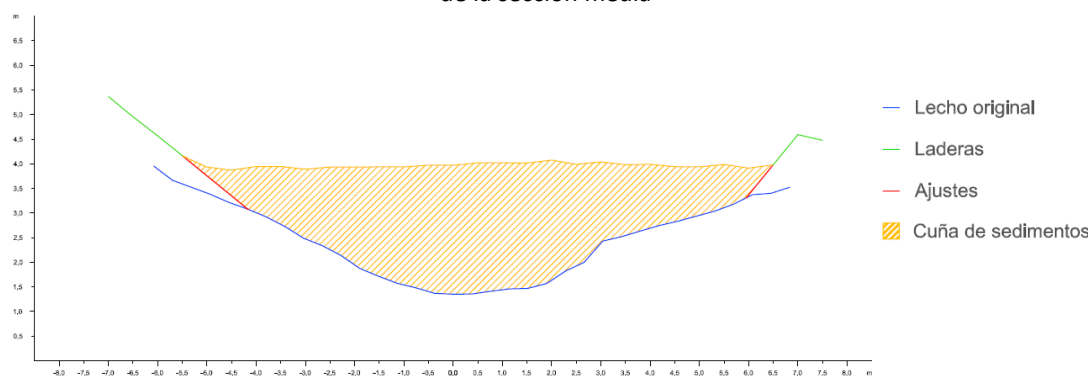


Figura A2.261. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

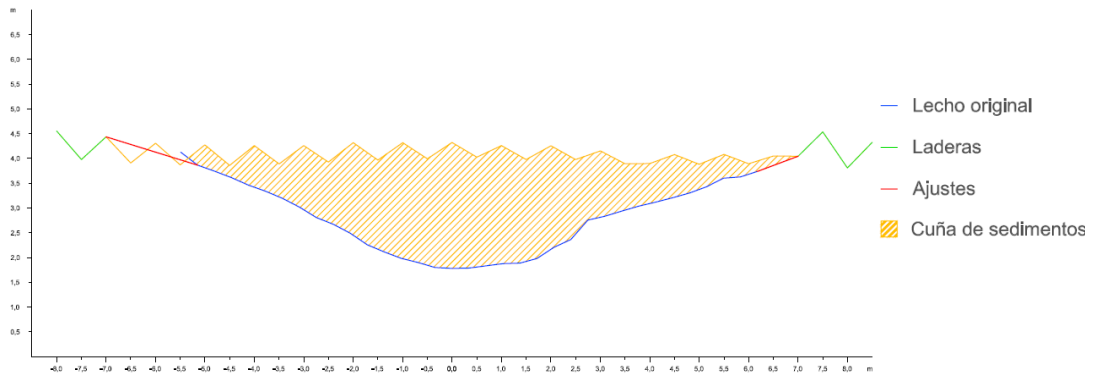


Figura A2.262. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

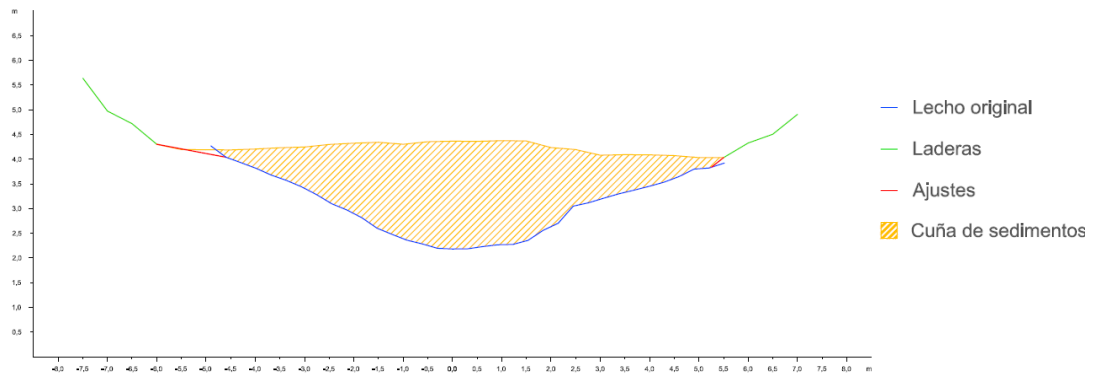


Figura A2.263. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

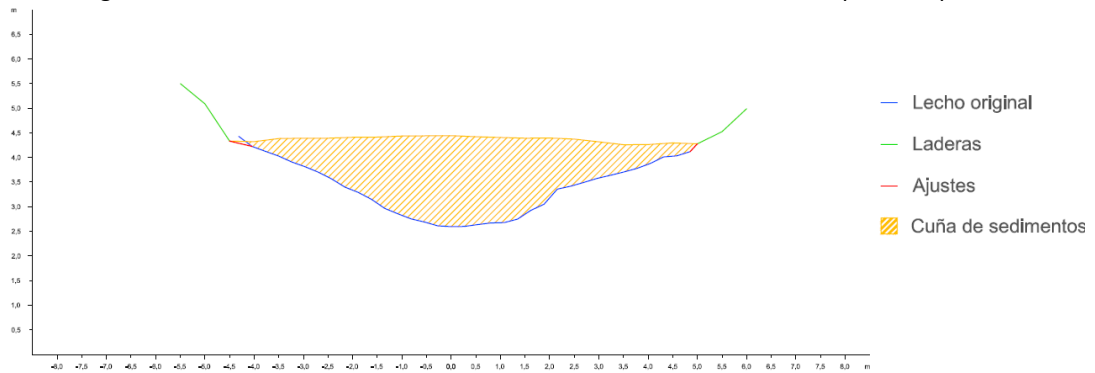


Figura A2.264. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

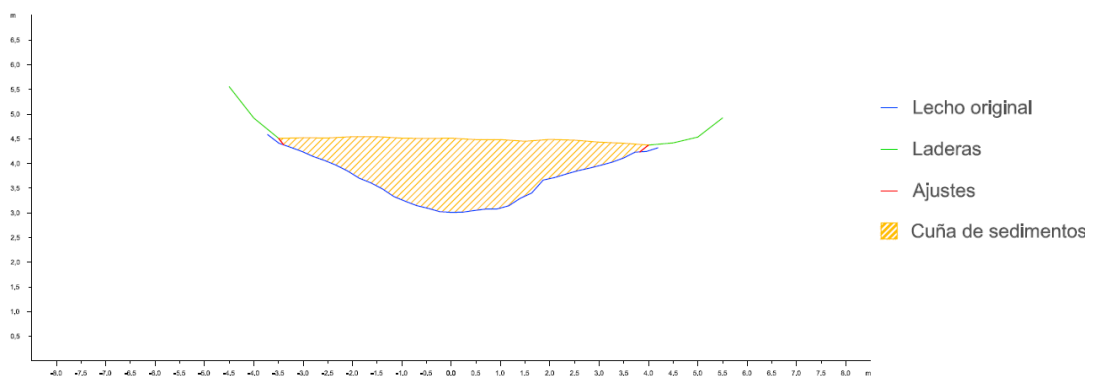


Figura A2.265. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

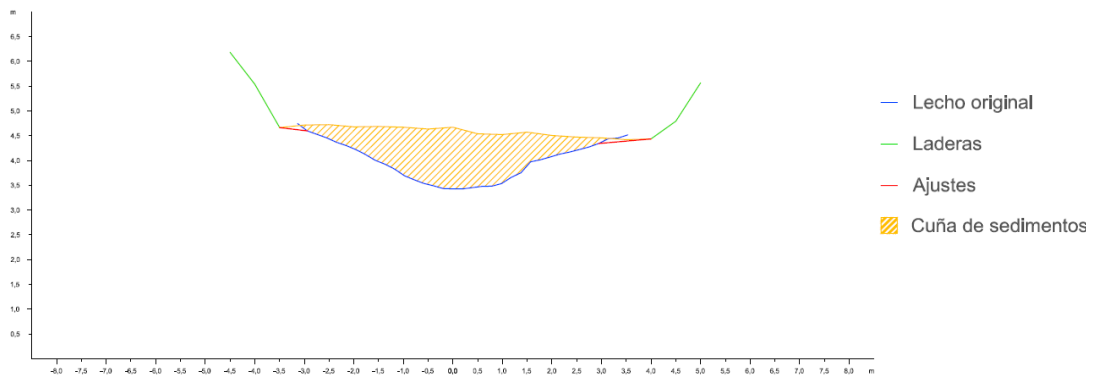


Figura A2.266. Sección trasversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

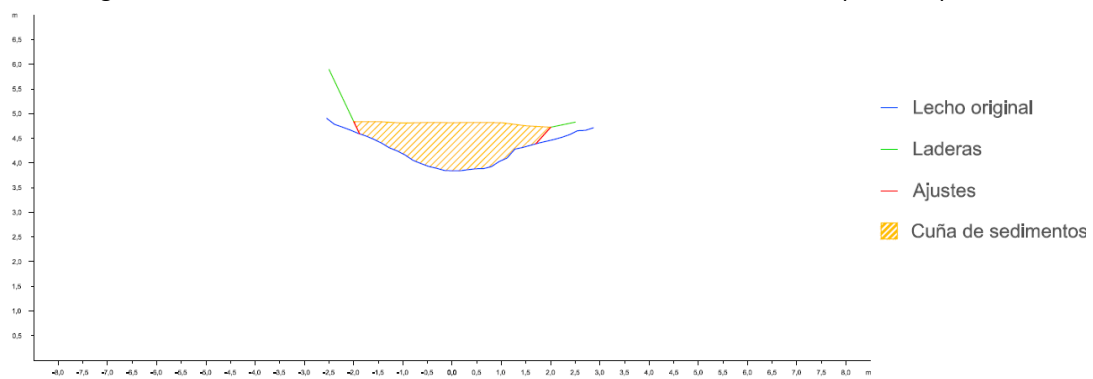


Figura A2.267. Sección trasversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

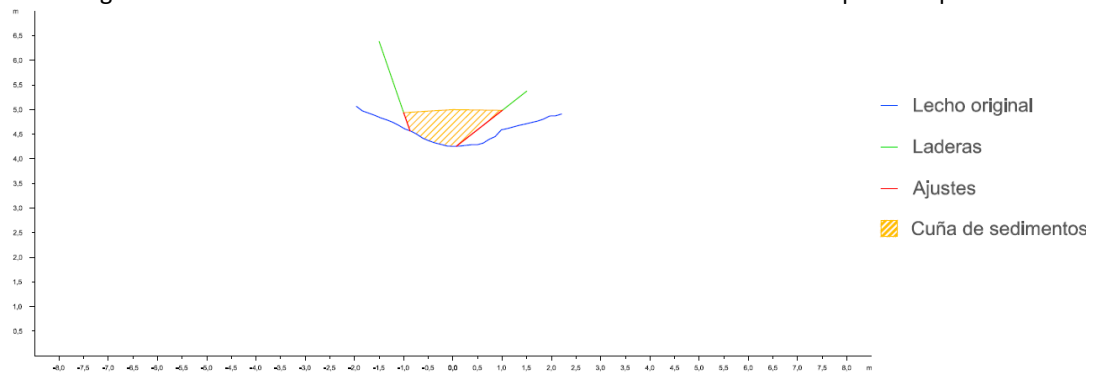


Figura A2.268. Sección trasversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

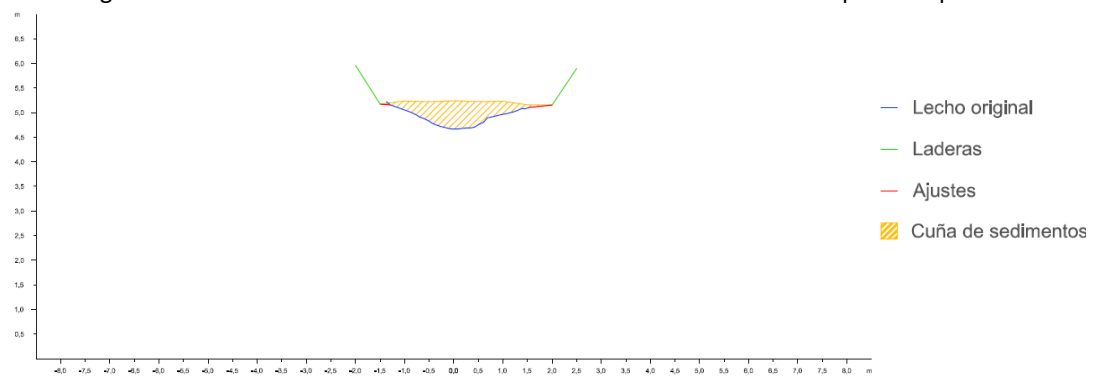


Figura A2.269. Sección trasversal 9 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

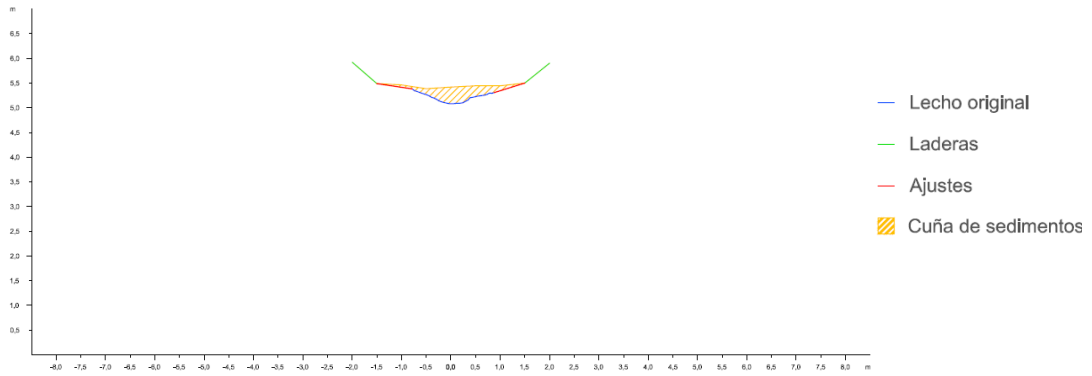


Figura A2.270. Sección transversal 10 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

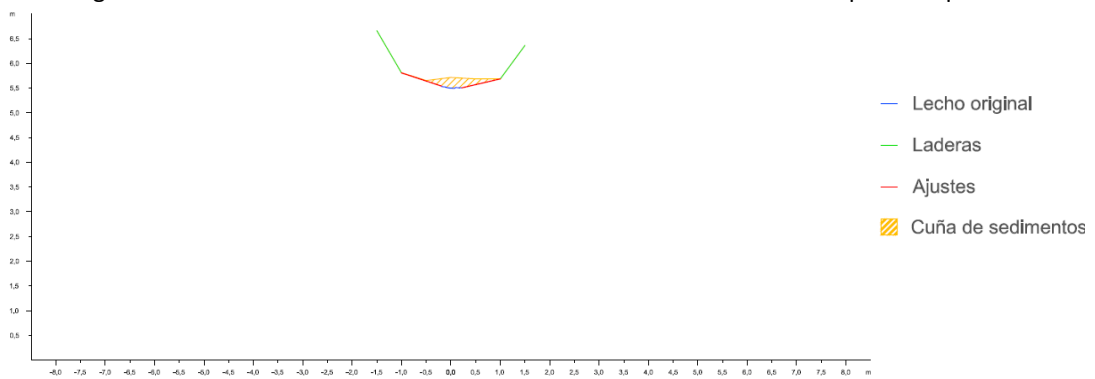


Figura A2.271. Sección transversal 11 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 62

Dique 63

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 63 (Tabla A2.58) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.272 a A2.281).



Tabla A2.58. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3	15,7658	49,5955	1	97,0511	103,7873
2		17,2979		3		
2	3	17,2979	44,0876	2	72,6332	72,5630
3		12,0938		4		
3	3	12,0938	28,5808	3	46,6791	41,7602
4		6,9600		5		
4	3	6,9600	20,5578	4	39,1028	40,4710
5		6,7452		6		
5	3	6,7452	17,8609	5	30,4694	30,9728
6		5,1621		7		
6	3	5,1621	12,3568	6	19,4478	18,4544
7		3,0757		8		
7	3	3,0757	7,5876	7	11,8789	11,8960
8		1,9827		9		
8	3	1,9827	4,2828	8	5,7826	5,2351
9		0,8725		10		
9	3	0,8725	1,7736	9	0,0000	0,0000
10		0,3099		Fin cuña		
10	3	0,8725	0,1673	Opción 1	188,0196	190,3572
Fin cuña		0,3099		Opción 2	186,7293	186,4863
Volumen total			186,8508		187,3744211	188,421756
Errores			A ₁ = -0,5237		A ₂ = 1,0473	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

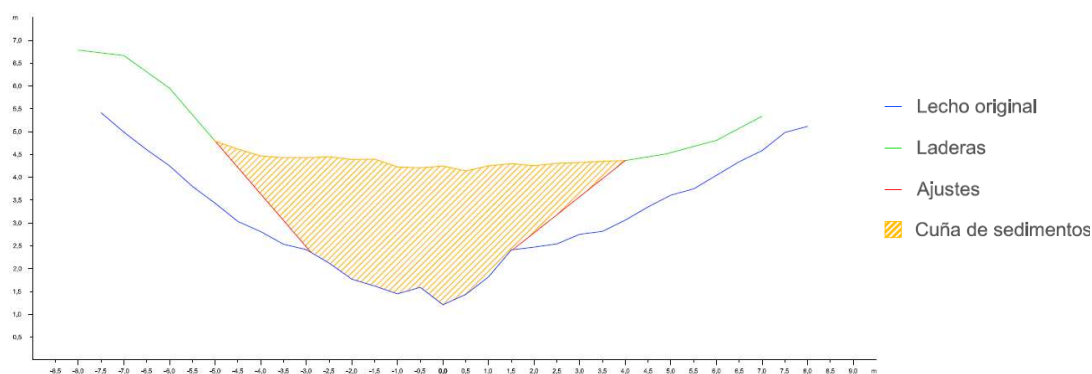


Figura A2.272. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

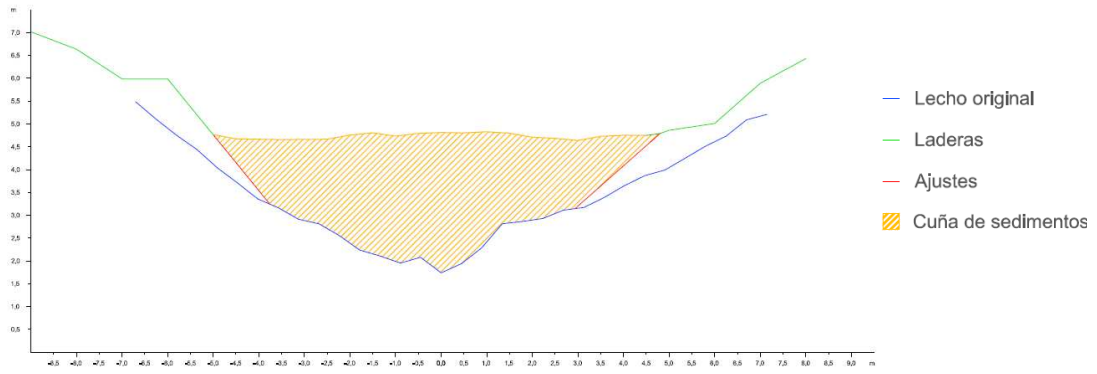


Figura A2.273. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

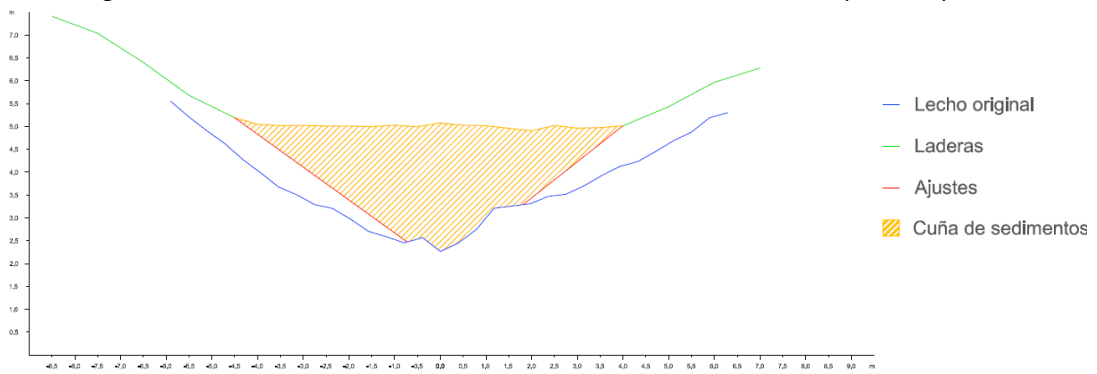


Figura A2.274. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

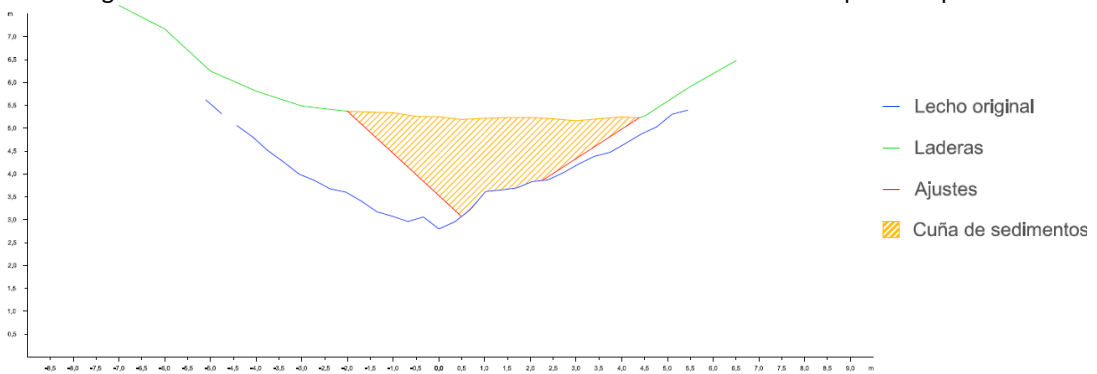


Figura A2.275. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

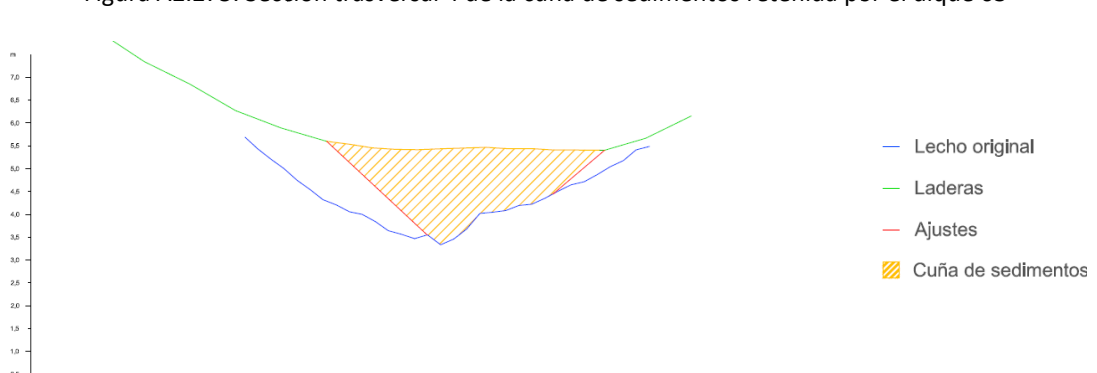


Figura A2.276. Sección trasversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

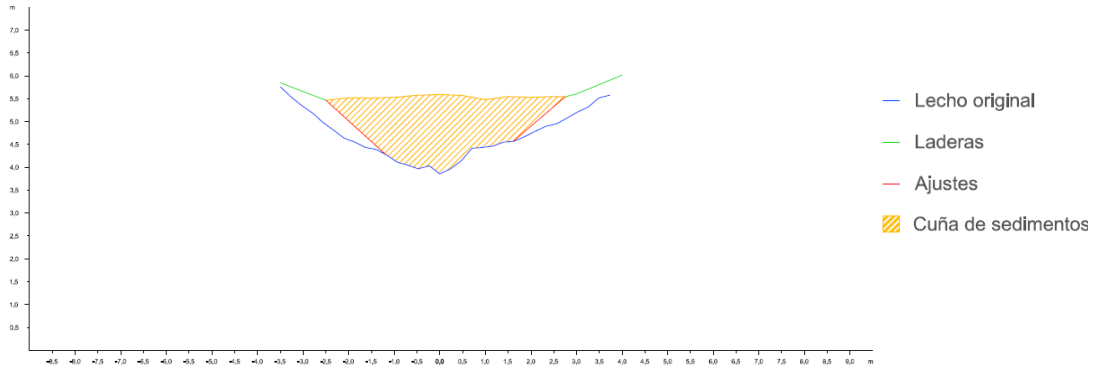


Figura A2.277. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

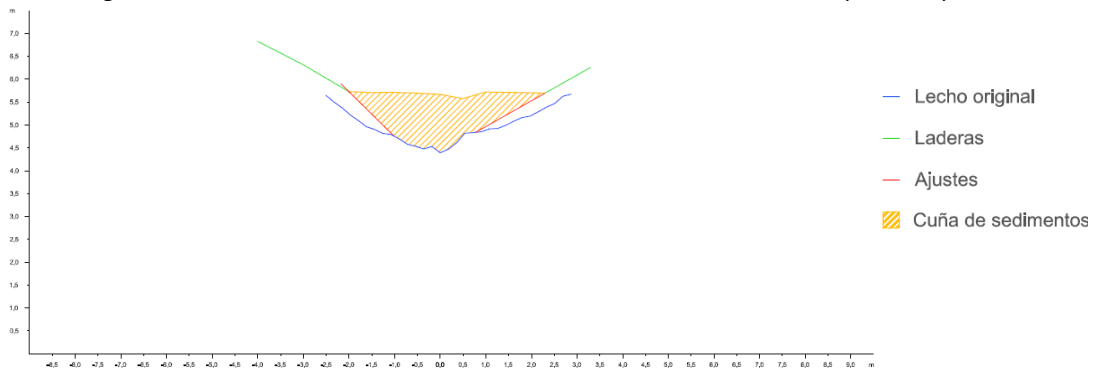


Figura A2.278. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

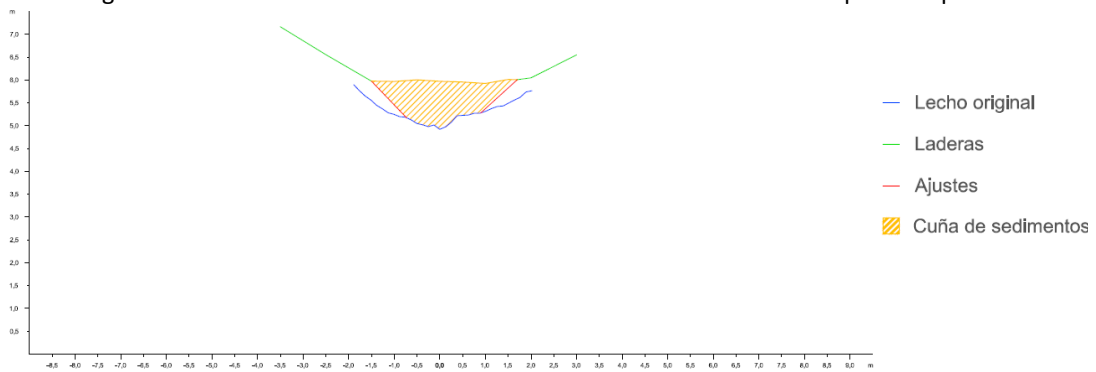


Figura A2.279. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

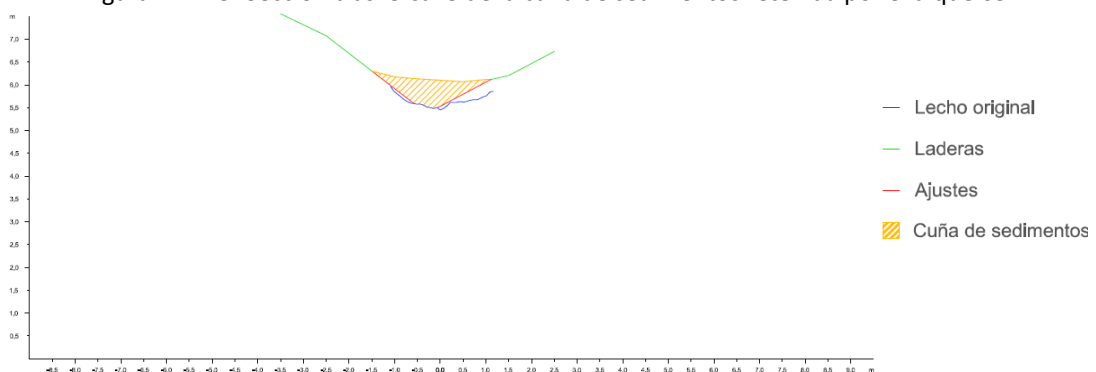


Figura A2.280. Sección transversal 9 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

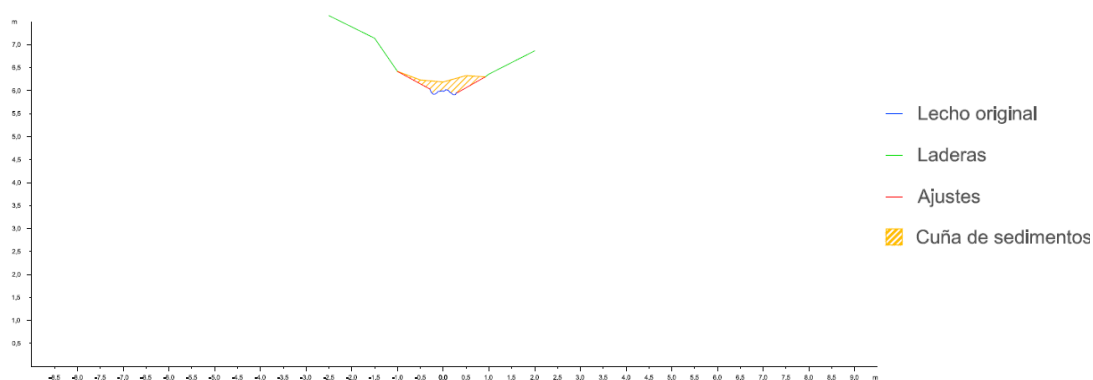


Figura A2.281. Sección trasversal 10 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 63

Dique 64

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 64 (Tabla A2.59) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.282 a A2.287).

Tabla A2.59. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		0,6405		1		
2	3,0	0,5739	1,8216	3	2,9934	3,4434
2		0,5739		2		
3	3,0	0,0573	0,9468	4	0,8079	0,3438
3		0,0573		3		
4	3,0	0,0048	0,0932	5	0,3765	0,0288
4		0,0048		4		
5	3,0	0,3000	0,4572	6	1,9048	1,8000
5		0,3000		5		
6	3,0	0,7000	1,5000	Fin cuña	3,0483	4,1300
6		0,7000		Opción 1	6,4182	7,6022
Fin	2,9	0,0000	1,0150	Opción 2	5,5493	4,9804
Volumen total			5,8338		5,9838	6,2913
Errores			A ₁ = -0,1500		A ₂ = 0,3075	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

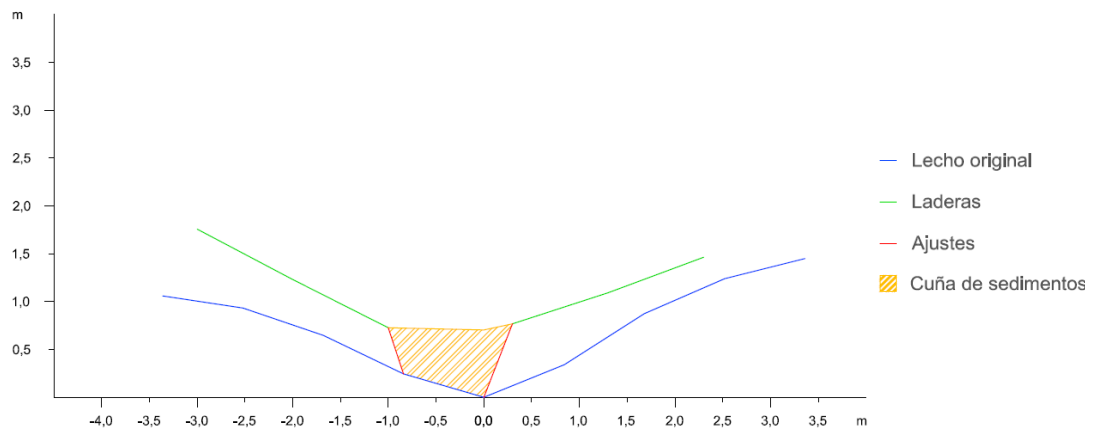


Figura A2.282. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

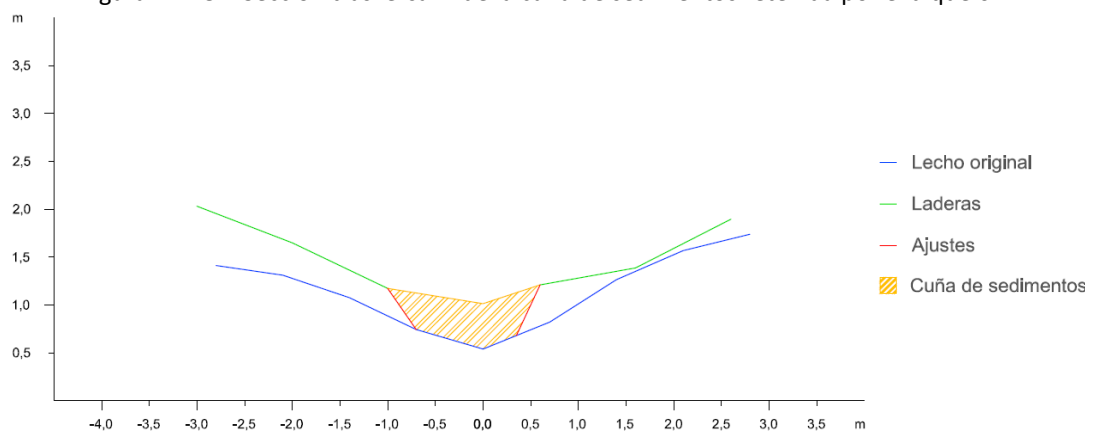


Figura A2.283. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

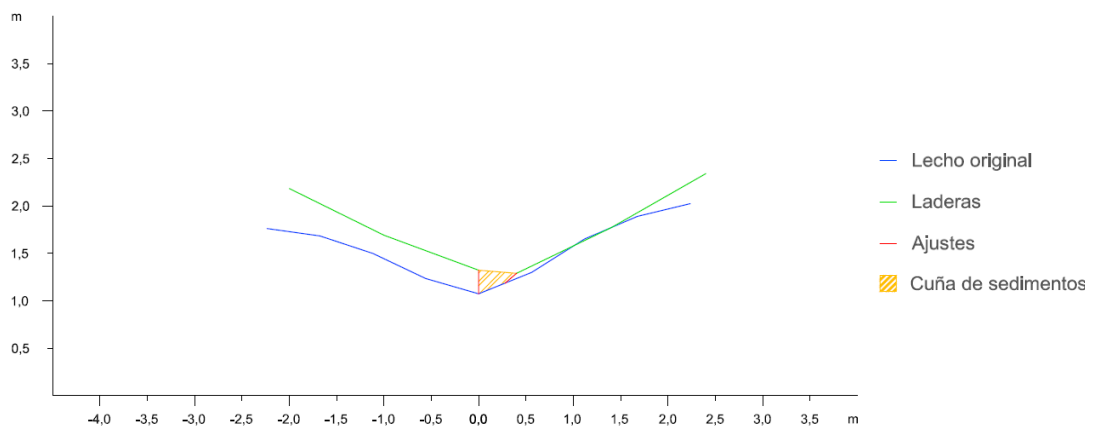


Figura A2.284. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

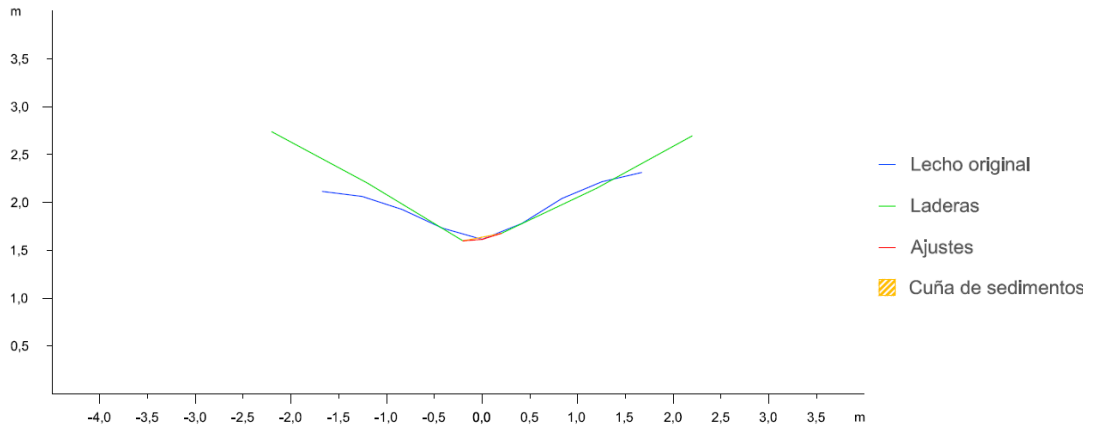


Figura A2.285. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

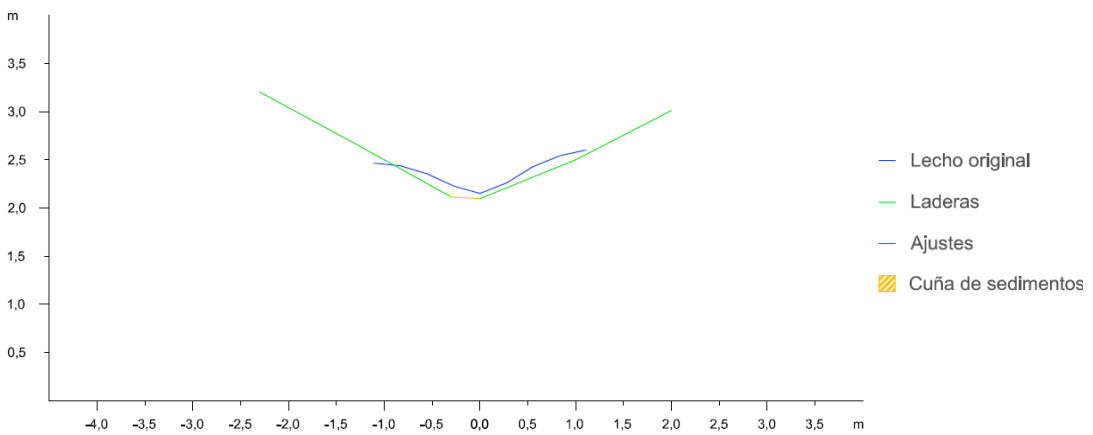


Figura A2.286. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

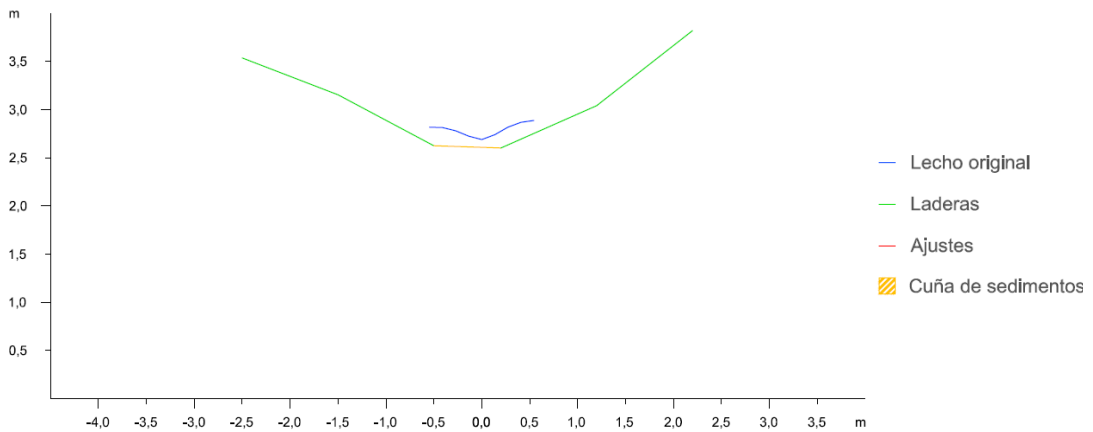


Figura A2.287. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 64

Dique 65

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 65 (Tabla A2.60) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.288 a A2.291).



Tabla A2.60. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 65

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	0,6701	0,7723	1	0,7193	0,4088
2		0,1022		3		
2	2,0	0,1022	0,1022	2	0,0901	0,0000
3		0,0000		4		
3	2,0	0,0000	0,0330	3	0,0814	0,1221
4		0,0330		Fin cuña		
4	1,70	0,0330	0,0281	Opción 1	0,8007	0,5309
Fin cuña		0,0000		Opción 2	0,8905	0,8004
Volumen total			0,9356		0,8456	0,6656
Errores			A ₁ = 0,0900		A ₂ = -0,1800	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

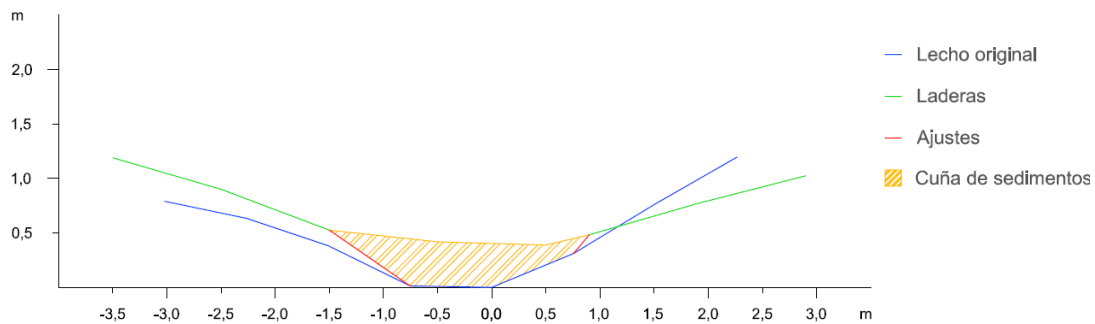


Figura A2.288. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 65

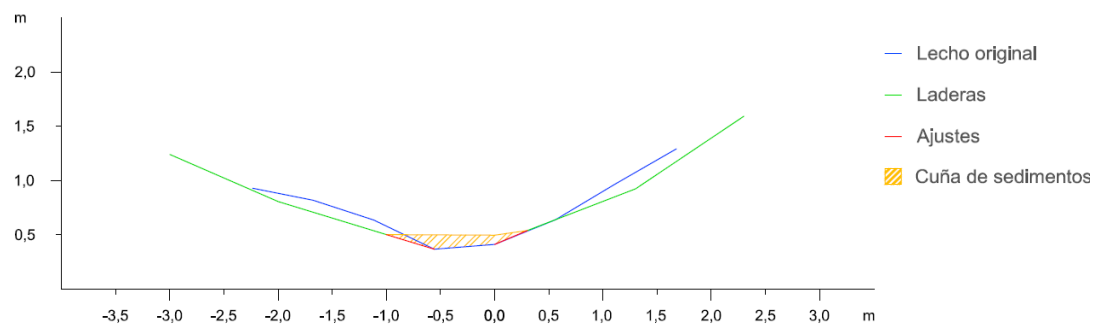


Figura A2.289. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 65

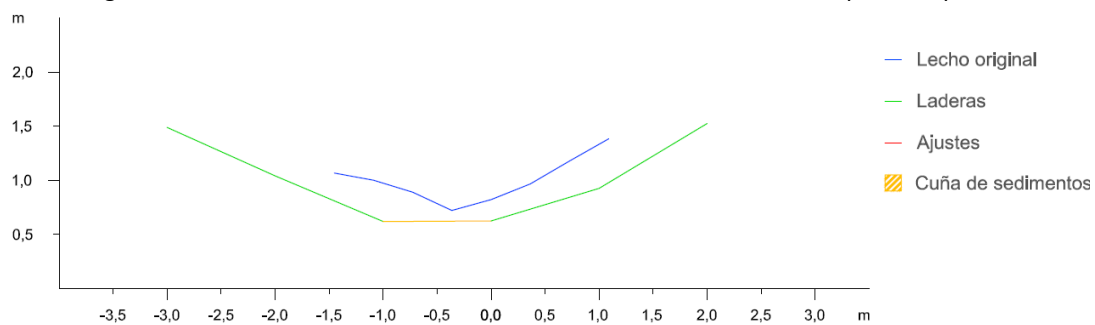


Figura A2.290. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 65

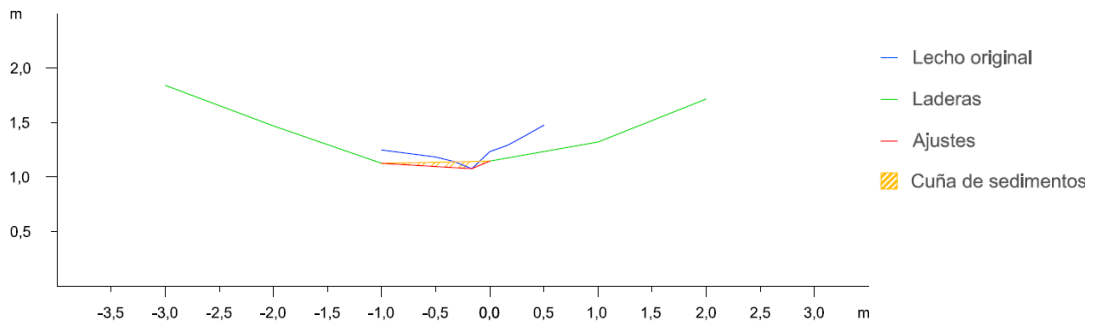


Figura A2.291. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 65

Dique 66

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 66 (Tabla A2.61) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.292 a A2.295).

Tabla A2.61. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 66

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	0,9625	1,7252	1	1,7233	1,1256
2		0,1876		3		
2	3,0	0,1876	0,2970	2	0,2292	0,0624
3		0,0104		4		
3	3,0	0,0104	0,0156	3	0,0099	0,0000
4		0,0000		Fin cuña		
4	2,70	0,0000	0,0000	Opción 1	1,7332	1,1256
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			2,0378		1,8438	1,4566
Errores			A ₁ = 0,1940		A ₂ = -0,3872	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

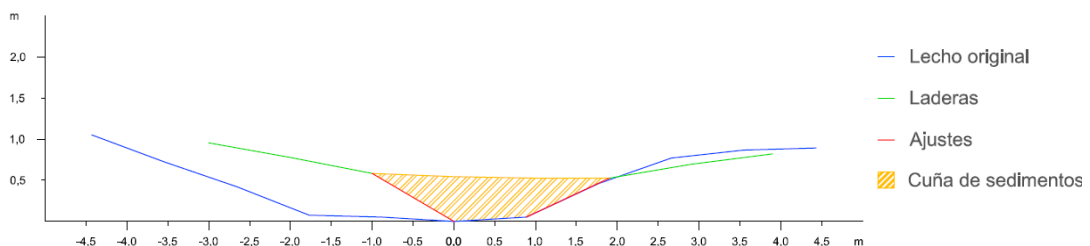


Figura A2.292. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 66

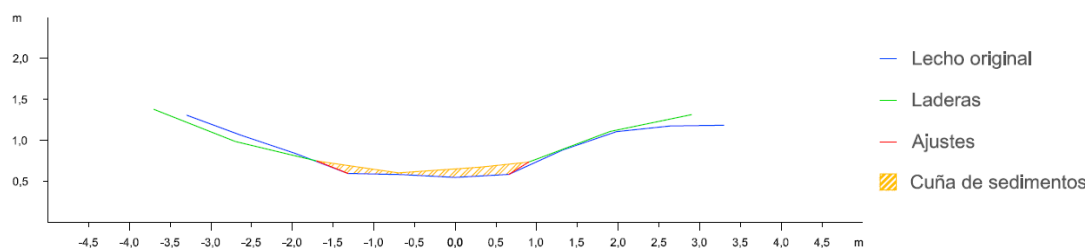


Figura A2.293. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 66

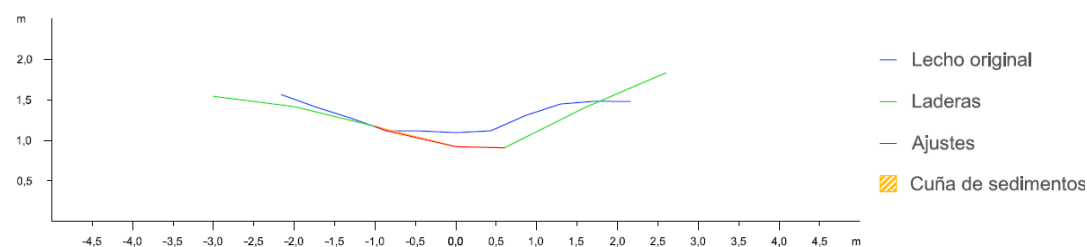


Figura A2.294. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 66

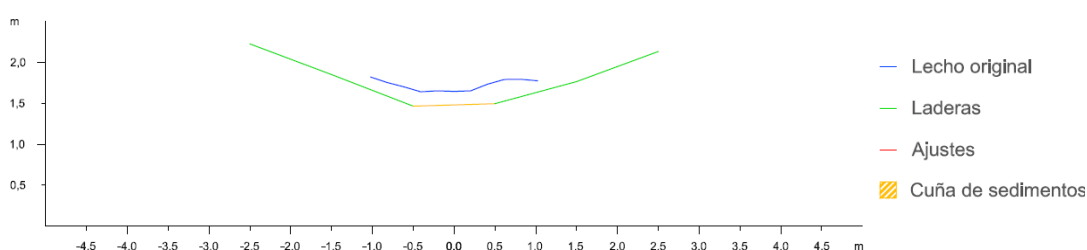


Figura A2.295. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 66

Dique 67

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 67 (Tabla A2.62) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.296 a A2.299).

Tabla A2.62. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 67

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	1,5964	1,1167	1	1,4566	1,2738
2		0,6369		3		
2	1,0	0,6369	0,4313	2	0,5397	0,4514
3		0,2257		4		
3	1,0	0,2257	0,1525	3	0,1357	0,1190
4		0,0793		Fin cuña		
4	0,50	0,0793	0,0198	Opción 1	1,5923	1,3928
Fin cuña		0,0000		Opción 2	1,6761	1,5879
Volumen total			1,7203		1,6342	1,4903
Errores			A ₁ = 0,0861		A ₂ = -0,1439	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes

obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

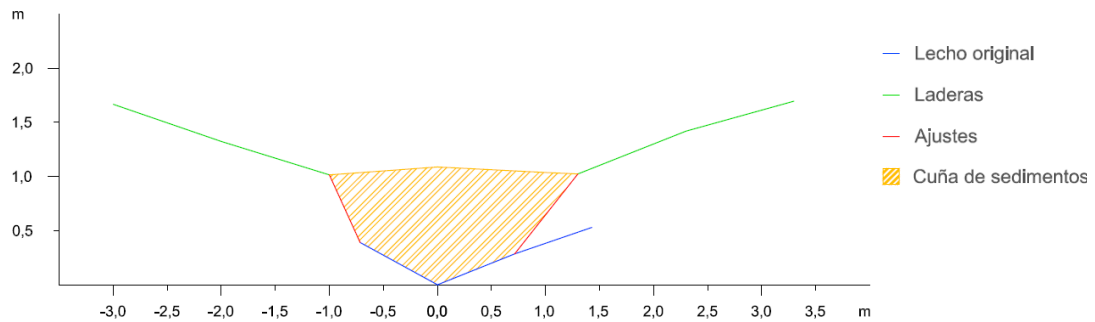


Figura A2.296. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 67

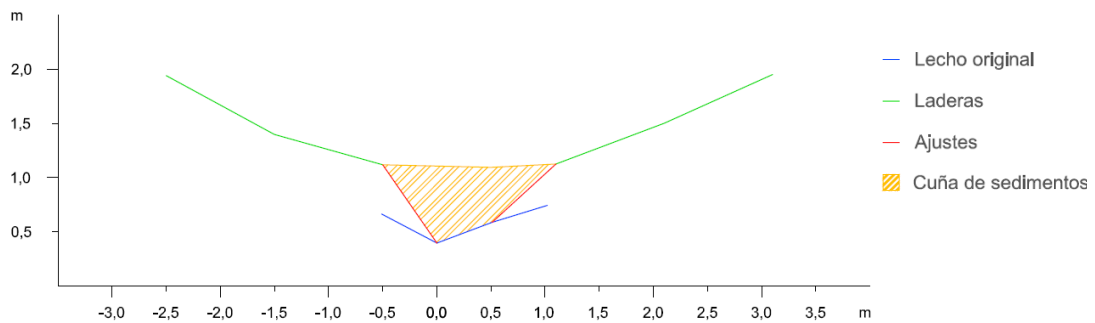


Figura A2.297. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 67

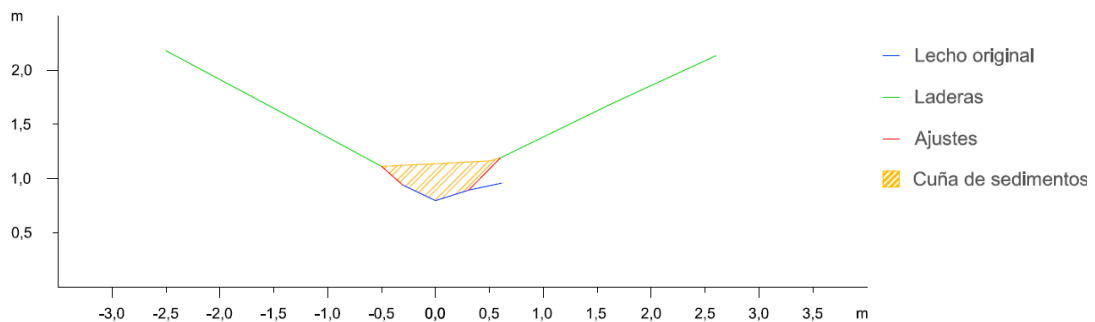


Figura A2.298. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 67

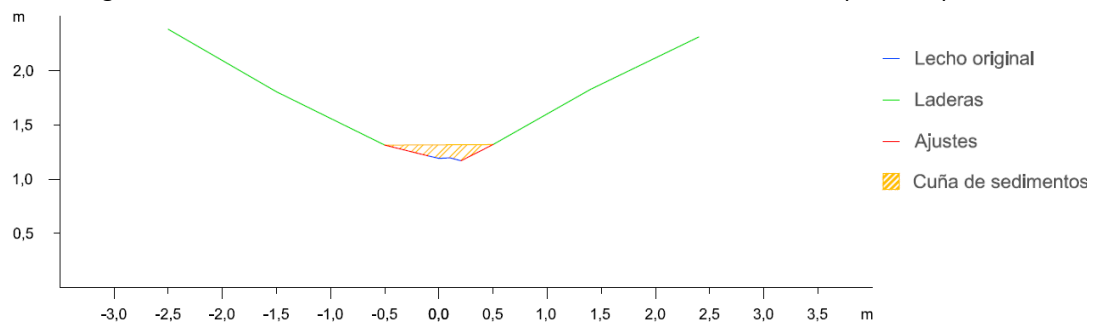


Figura A2.299. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 67

Dique 68

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 68 (Tabla A2.63) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la



cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.300 a A2.303).

Tabla A2.63. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 68

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,3111	5,3379	1	8,1770	8,1072
2		2,0268		3		
2	2,0	2,0268	2,8740	2	3,7971	3,3888
3		0,8472		4		
3	2,0	0,8472	1,1273	3	1,2461	1,0644
4		0,2801		Fin cuña		
4	1,80	0,2801	0,2521	Opción 1	9,4231	9,1716
Fin cuña		0,0000		Opción 2	9,3871	8,9788
Volumen total			9,5913		9,4051	9,0752
Errores			A ₁ = 0,1862		A ₂ = -0,3300	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

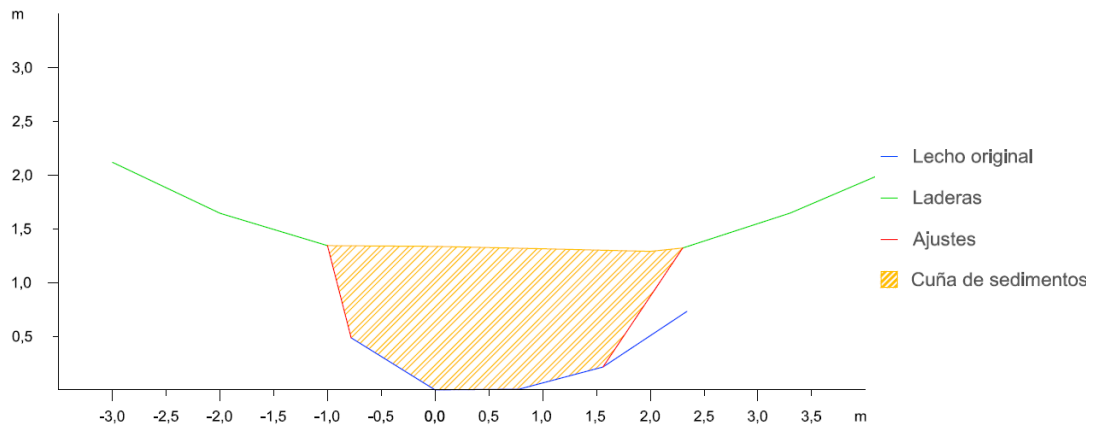


Figura A2.300. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 68

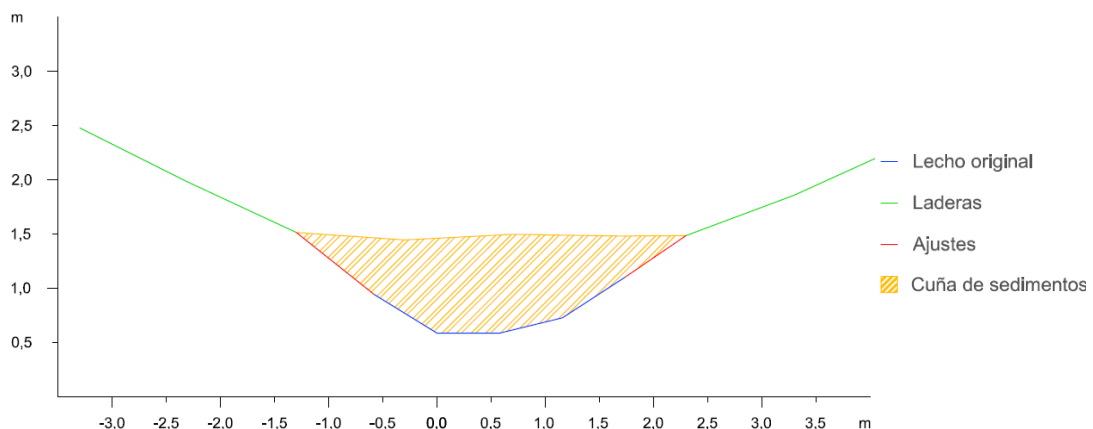


Figura A2.301. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 68

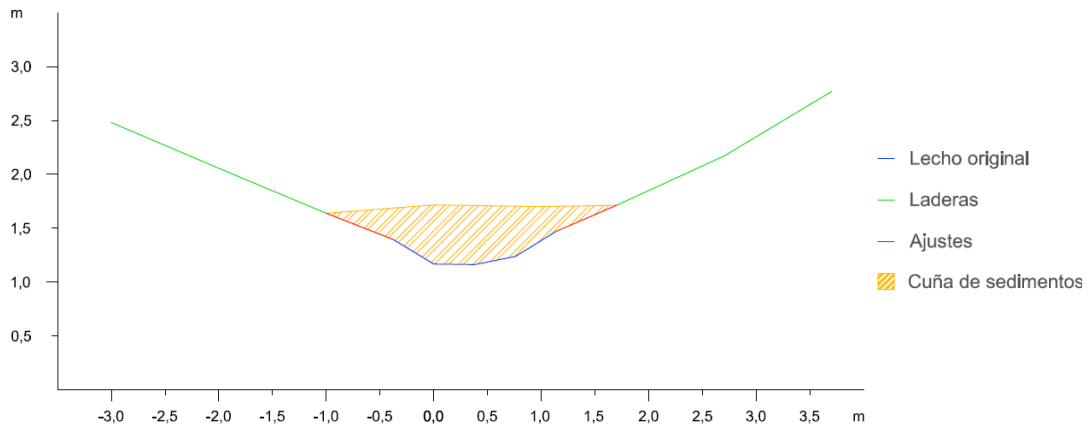


Figura A2.302. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 68

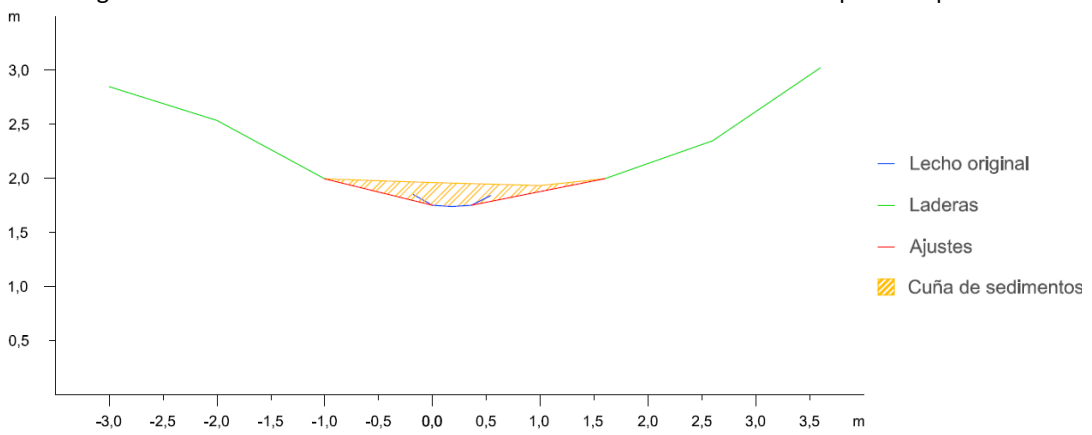


Figura A2.303. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 68

Dique 69

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 69 (Tabla A2.64) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.304 a A2.307).



Tabla A2.64. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 69

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	5,8542	15,2816	1	29,4746	26,0010
2		4,3335		3		
2	3,0	4,3335	15,9299	2	29,8961	37,7184
3		6,2864		4		
3	3,0	6,2864	10,0551	3	6,3635	2,0016
4		0,4170		Fin cuña		
4	1,80	0,4170	0,3753	Opción 1	35,8381	28,0026
Fin cuña		0,0000		Opción 2	45,5530	53,3753
Volumen total			41,6418		40,6955	40,6889
Errores			A ₁ = 0,9463		A ₂ = -0,0066	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

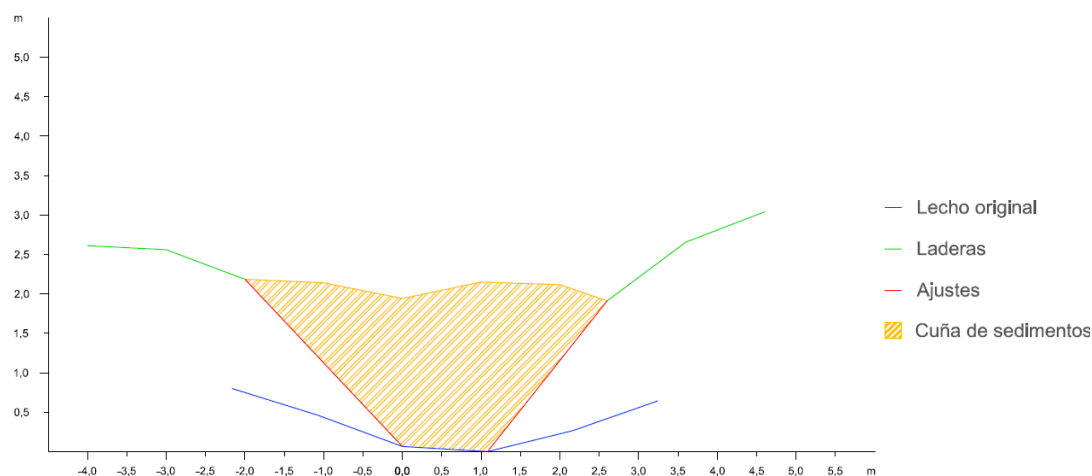


Figura A2.304. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 69

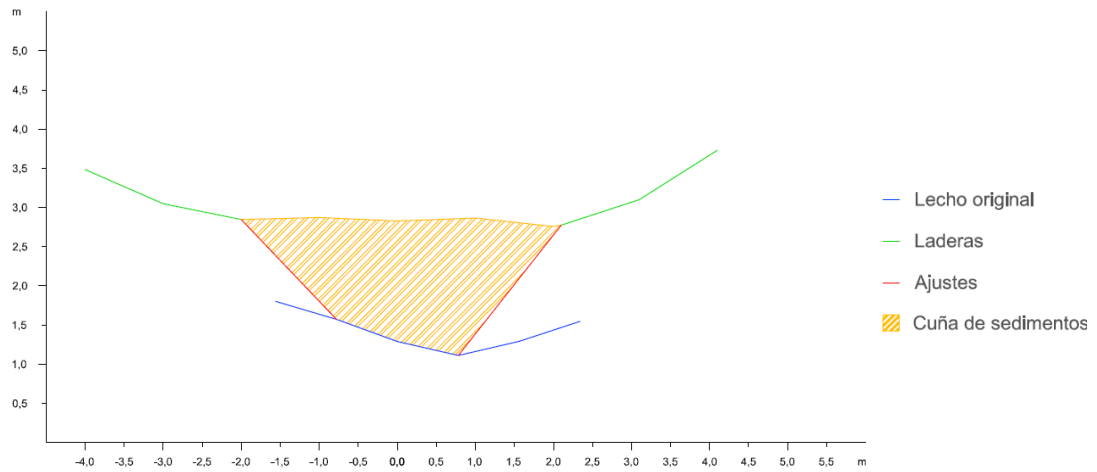


Figura A2.305. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 69

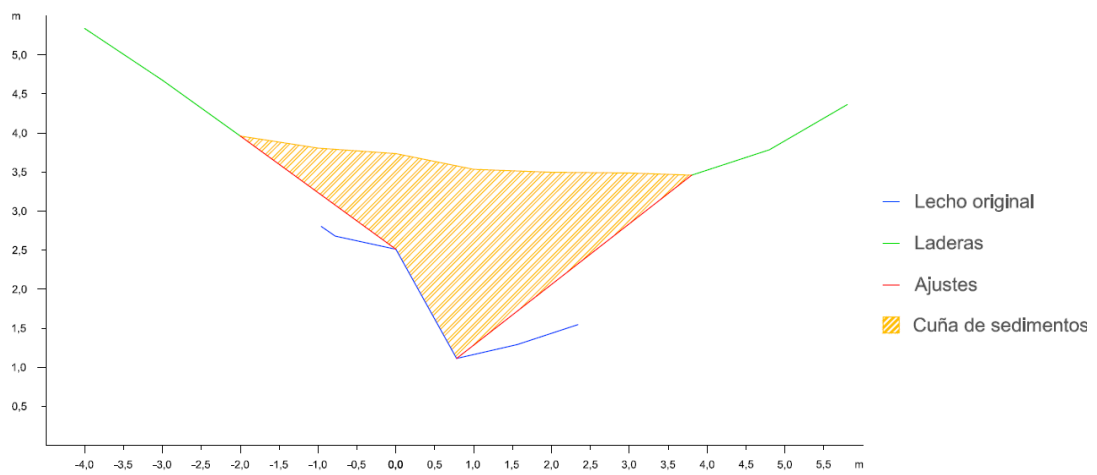


Figura A2.306. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 69

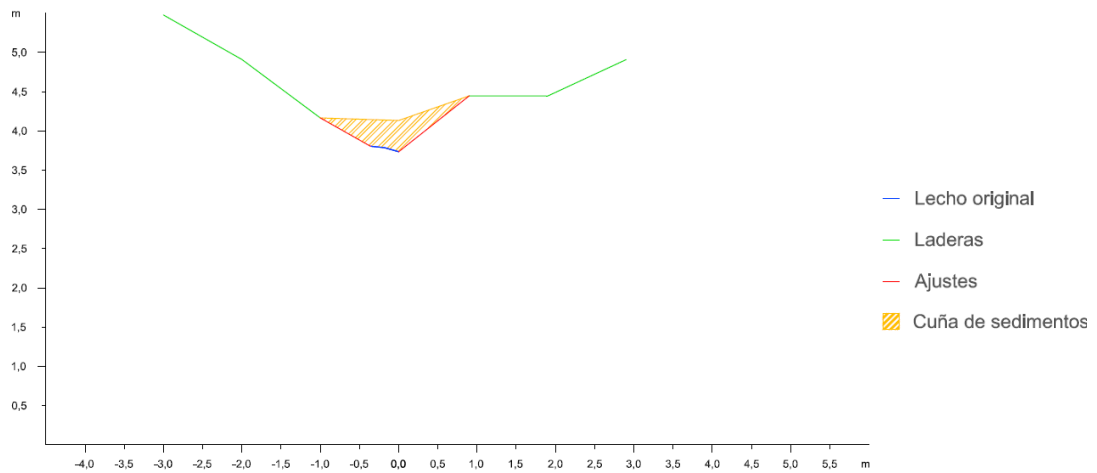


Figura A2.307. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 69

Dique 70

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 70 (Tabla A2.65) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la



cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.308 a A2.310).

Tabla A2.65. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 70

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,7178	4,6474	1	5,0002	3,7184
2		0,9296		3		
2	2,0	0,9296	0,9937	2	0,6523	0,2115
3		0,0641		Fin cuña		
3	1,30	0,0641	0,0417	Opción 1	5,0419	3,7601
Fin cuña		0,0000		Opción 2	5,2997	4,8589
Volumen total			5,682765		5,1708	4,3095
Errores			A ₁ = 0,5120		A ₂ = -0,8613	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

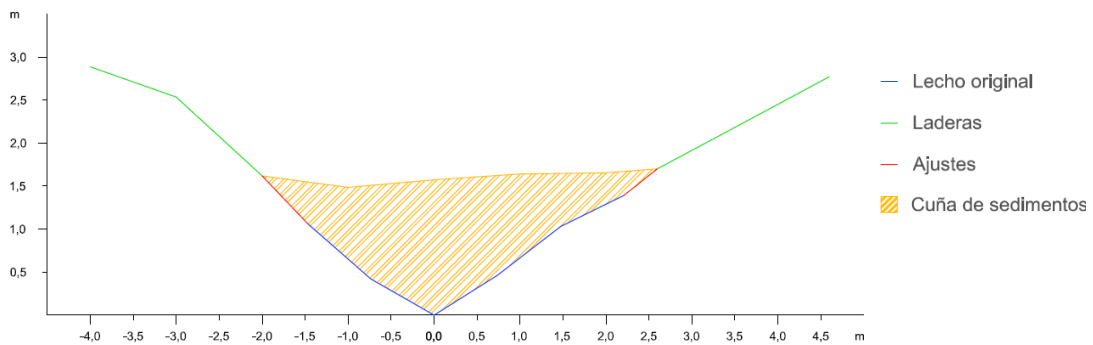


Figura A2.308. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 70

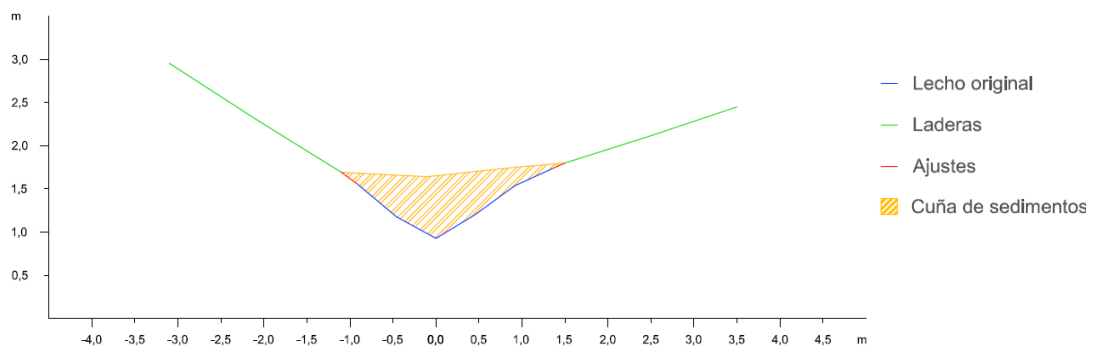


Figura A2.309. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 70

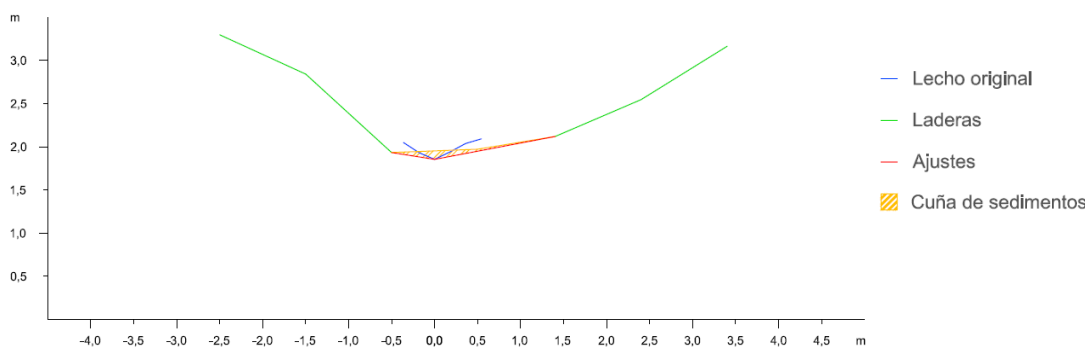


Figura A2.310. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 70

Dique 71

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 71 (Tabla A2.66) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.311 a A2.314).

Tabla A2.66. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 71

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,3111	5,3379	1	8,1770	8,1072
2		2,0268		3		
2	2,0	2,0268	2,8740	2	3,7971	3,3888
3		0,8472		4		
3	2,0	0,8472	1,1273	3	1,2461	1,0644
4		0,2801		Fin cuña		
4	1,80	0,2801	0,2521	Opción 1	9,4231	9,1716
Fin cuña		0,0000		Opción 2	9,3871	8,9788
Volumen total			9,5913		9,4051	9,0752
Errores			A ₁ = 0,1862		A ₂ = -0,3300	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

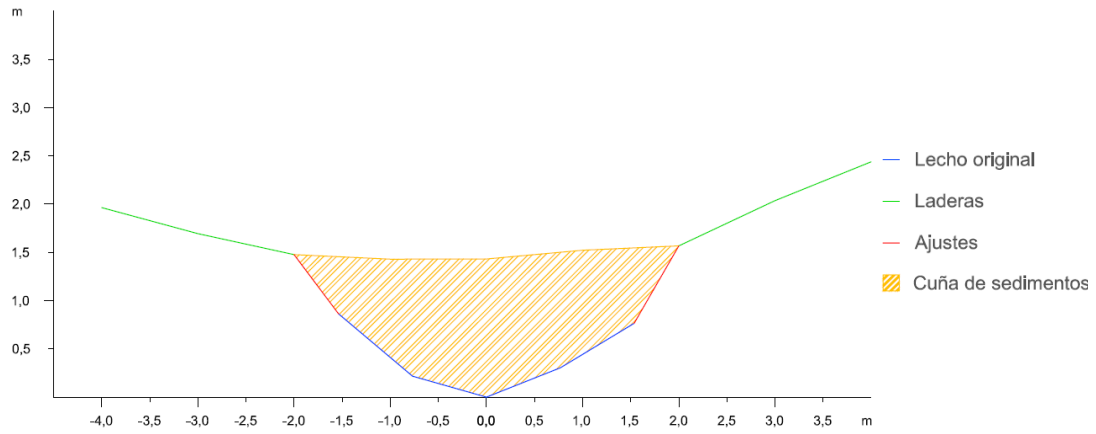


Figura A2.311. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 71

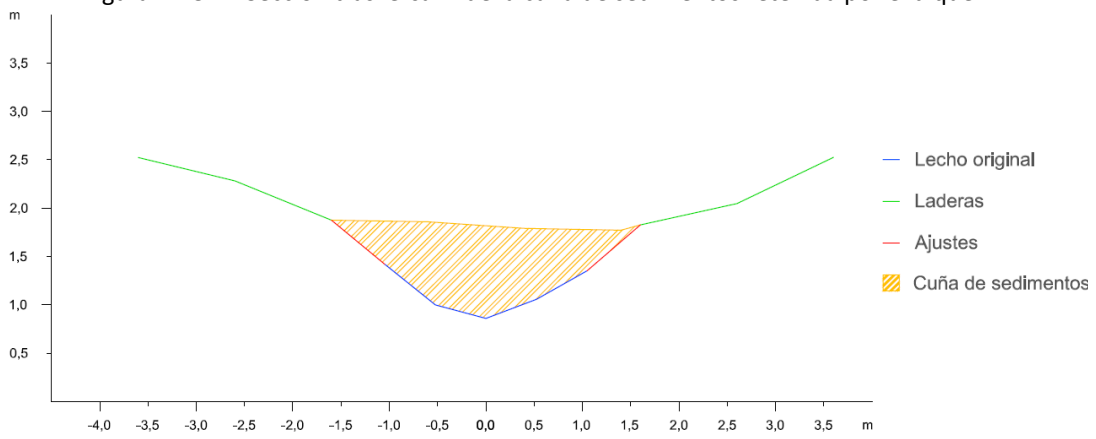


Figura A2.312. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 71

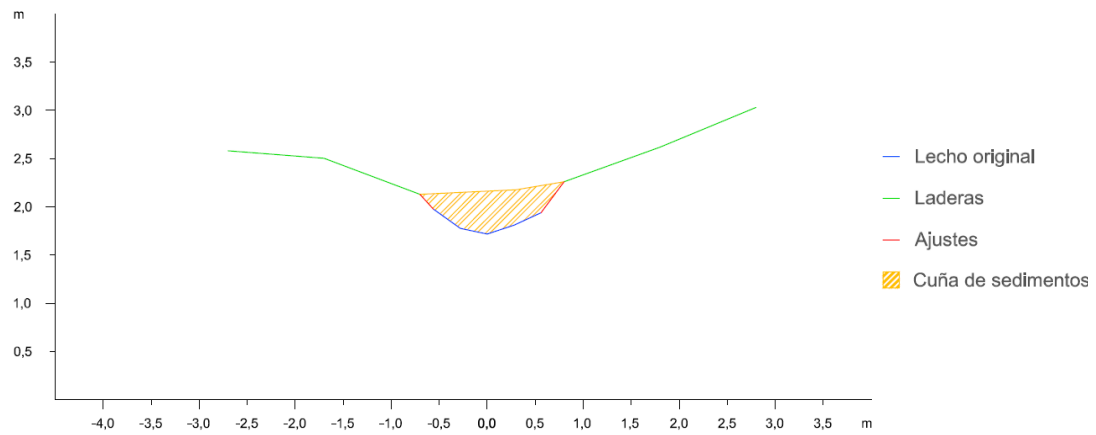


Figura A2.313. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 71

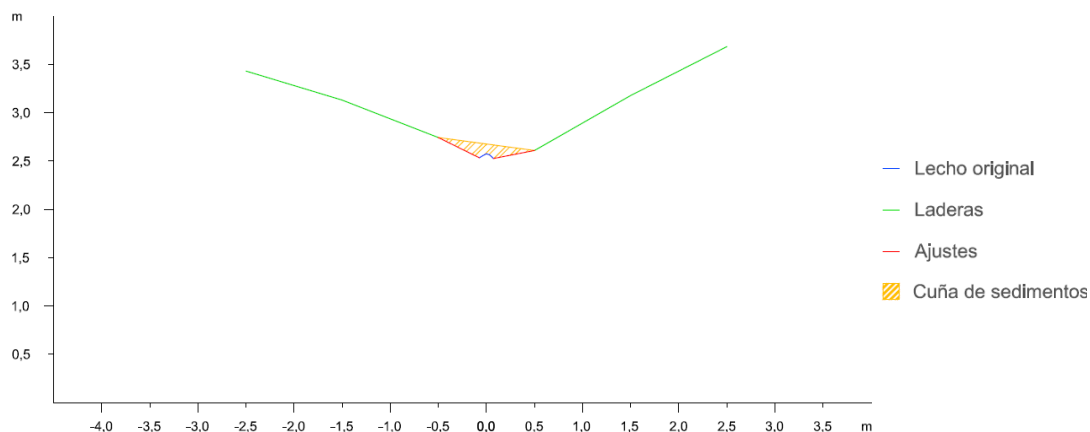


Figura A2.314. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 71

Dique 72

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 72 (Tabla A2.67) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.315 a A2.317).

Tabla A2.67. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 72

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	10,9212	15,5250	1	21,2898	18,4152
2		4,6038		3		
2	2,0	4,6038	7,2021	2	9,2482	9,6137
3		2,5983		Fin cuña		
3	1,70	2,5983	2,2086	Opción 1	23,4984	20,6238
Fin cuña		0,0000		Opción 2	24,7732	25,1387
Volumen total			24,935655		24,1358	22,8812
Errores			A₁= 0,7999		A₂= -1,2545	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

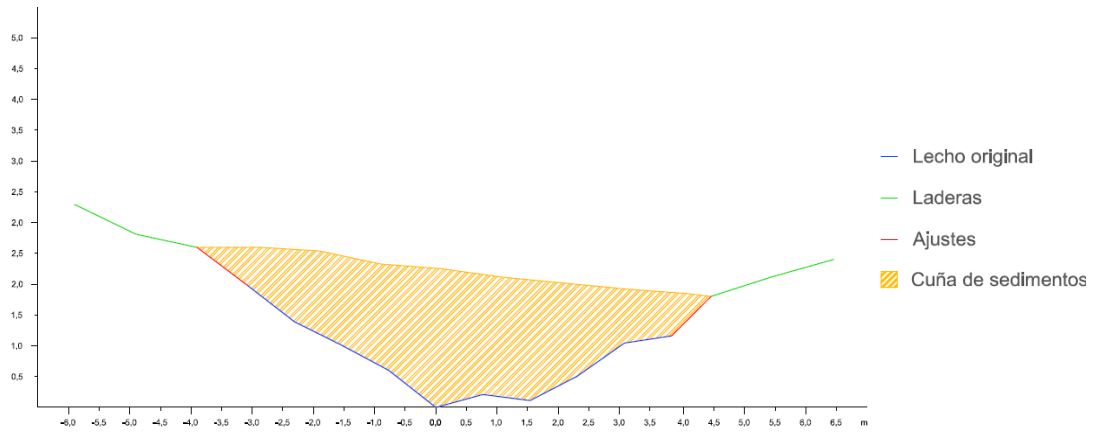


Figura A2.315. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 72

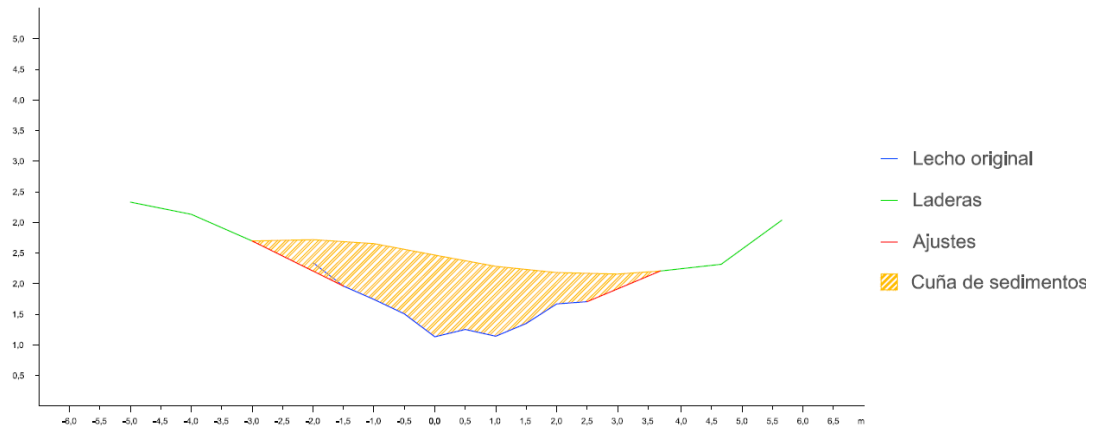


Figura A2.316. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 72

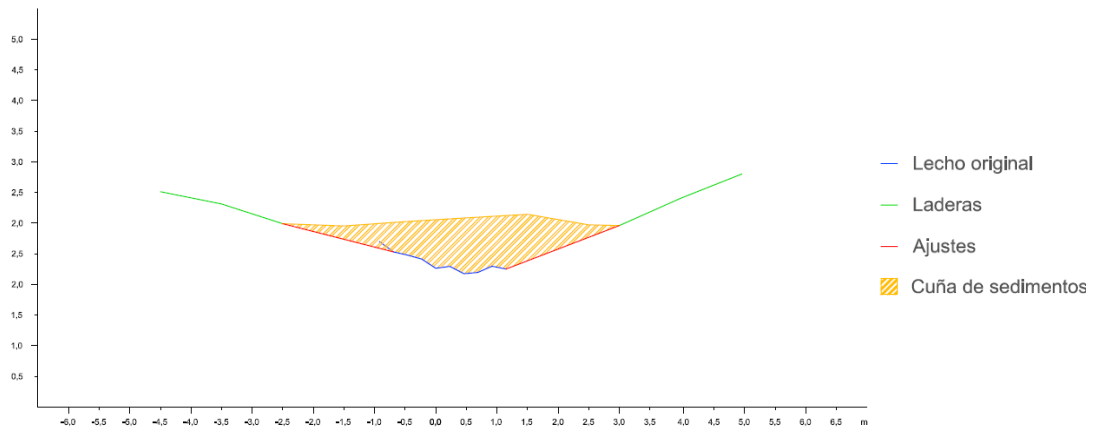


Figura A2.317. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 72

Dique 74

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 74 (Tabla A2.68) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.318 a A2.320).

Tabla A2.68. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 74

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	4,2793	4,9583	1	4,7441	2,7160
2		0,6790		3		
2	2,0	0,6790	0,7999	2	0,7751	0,4836
3		0,1209		Fin cuña		
3	2,00	0,1209	0,1209	Opción 1	4,8650	2,8369
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			5,8791		5,2992	4,1394
Errores			A₁= 0,5799		A₂= -1,1598	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

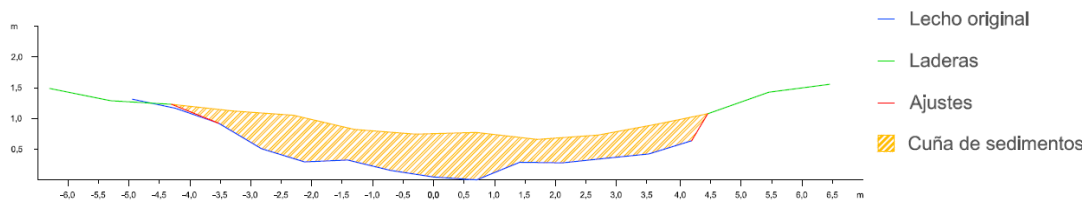


Figura A2.318. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 74

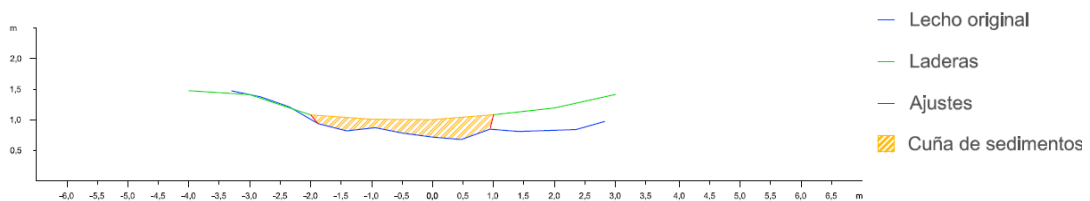


Figura A2.319. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 74

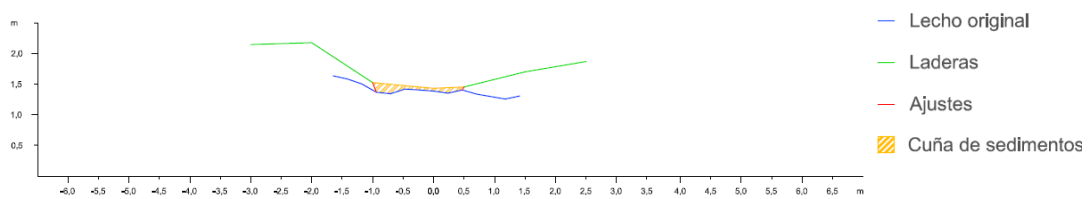


Figura A2.320. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 74

Dique 75

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 75 (Tabla A2.69) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.321 a A2.323).



Tabla A2.69. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 75

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,9143	5,5399	1	7,2107	6,5024
2		1,6256		3		
2	2,0	1,6256	2,0250	2	2,0414	1,5177
3		0,3994		Fin cuña		
3	1,80	0,3994	0,3595	Opción 1	7,5702	6,8619
Fin cuña		0,0000		Opción 2	7,5813	7,0576
Volumen total			7,92436		7,5757	6,9597
Errores			A₁= 0,3486		A₂= -0,6160	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

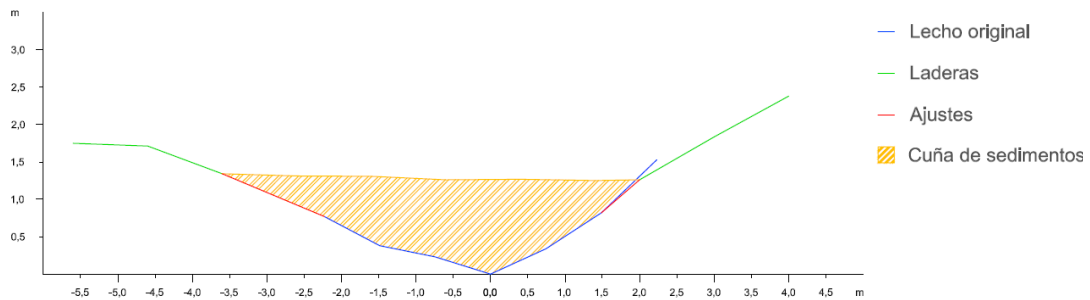


Figura A2.321. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 75

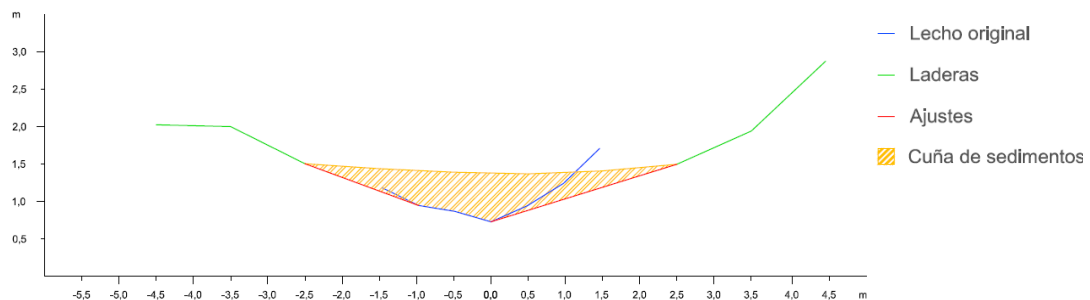


Figura A2.322. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 75

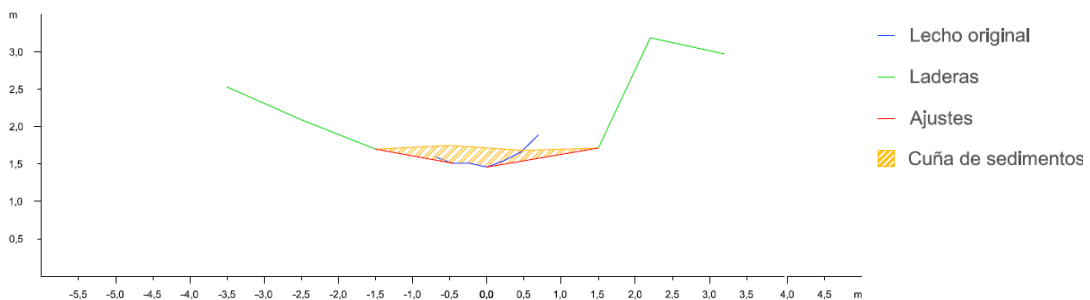


Figura A2.323. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 75

Dique 76

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 76 (Tabla A2.70) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.324 a A2.328).

Tabla A2.70. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 76

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	3,3563	2,7673	1	4,3611	4,3564
2		2,1782		3		
2	1,0	2,1782	1,5962	2	2,1994	2,0282
3		1,0141		4		
3	1,0	1,0141	0,6889	3	0,8281	0,7274
4		0,3637		5		
4	1,0	0,3637	0,1896	4	0,1063	0,0231
5		0,0154		Fin cuña		
5	0,5	0,0154	0,0039	Opción 1	5,1930	5,0877
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			5,2457		5,1330	4,9531
Errores			A ₁ = 0,1127		A ₂ = -0,1799	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

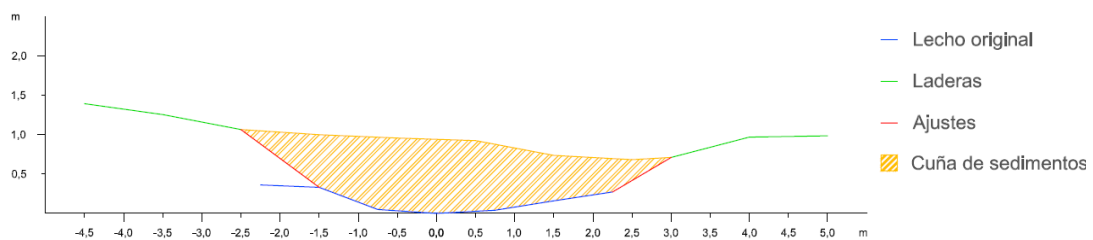


Figura A2.324. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 76

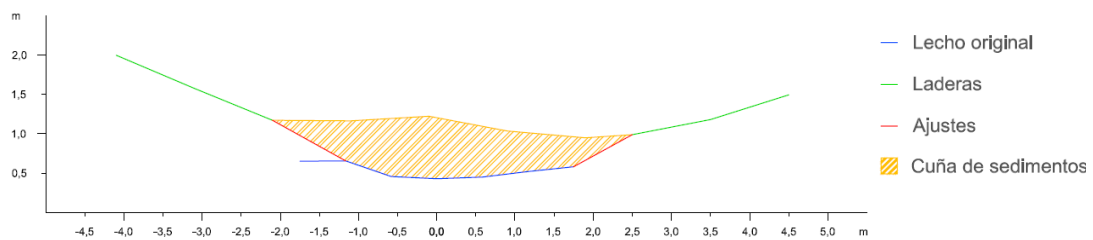


Figura A2.325. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 76

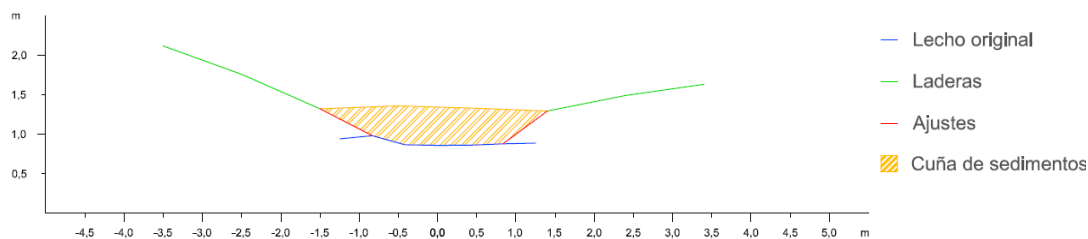


Figura A2.326. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 76

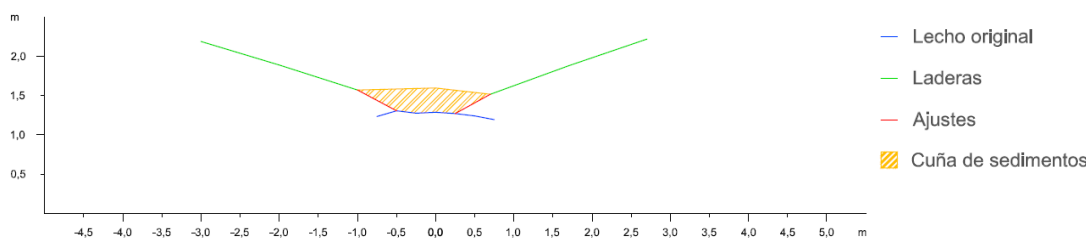


Figura A2.327. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 76

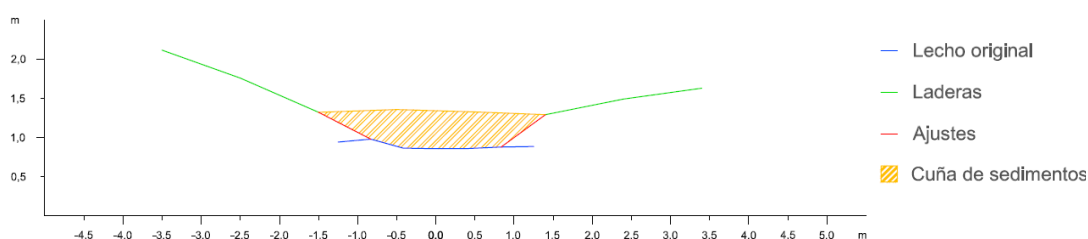


Figura A2.328. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 76

Dique 78

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 78 (Tabla A2.71) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.329 a A2.333).

Tabla A2.71. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 78

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	3,1461	6,3211	1	11,1386	12,7000
2		3,1750		3		
2	2,0	3,1750	4,0368	2	4,7297	3,4472
3		0,8618		4		
3	2,0	0,8618	1,3341	3	2,1240	1,8892
4		0,4723		5		
4	2,0	0,4723	0,9073	4	0,8849	1,0440
5		0,4350		Fin cuña		
5	0,4	0,4350	0,0870	Opción 1	13,3496	14,6762
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			12,6863		12,6426	12,7443
Errores			A ₁ = 0,0437		A ₂ = 0,1016	



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

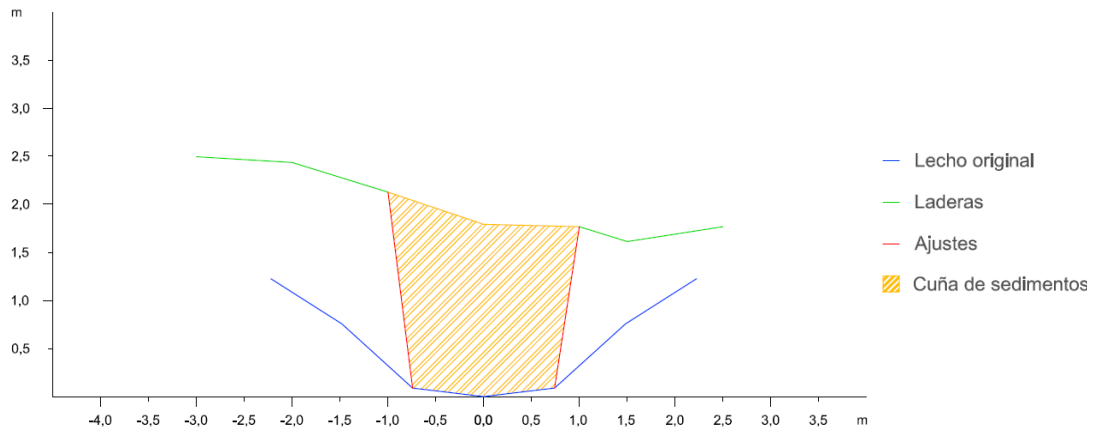


Figura A2.329. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 78

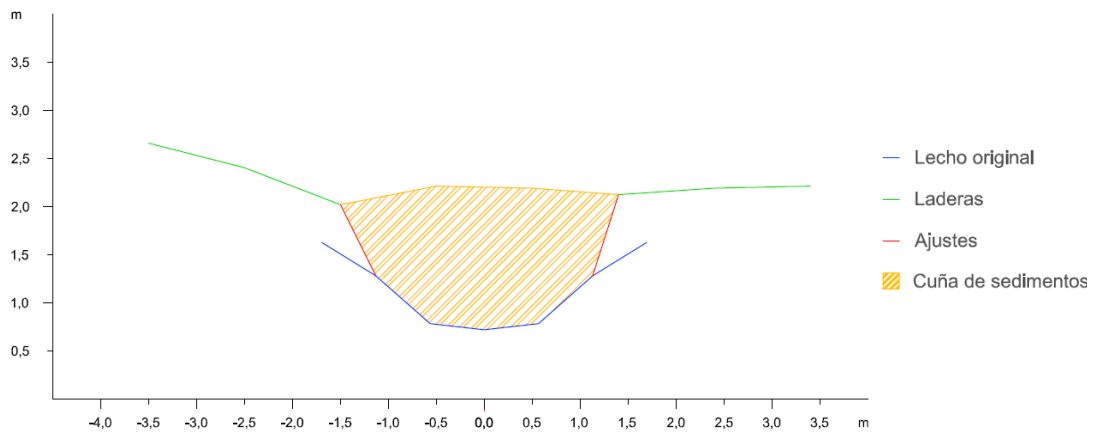


Figura A2.330. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 78

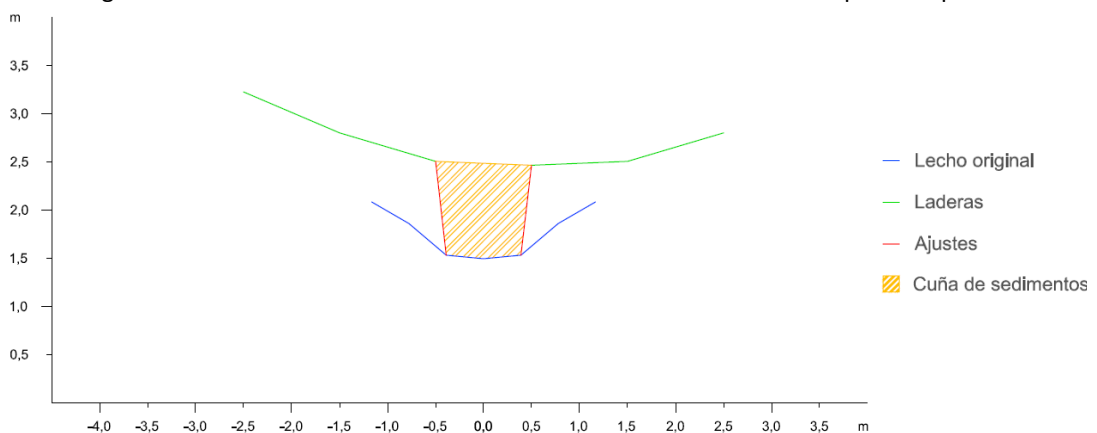


Figura A2.331. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 78

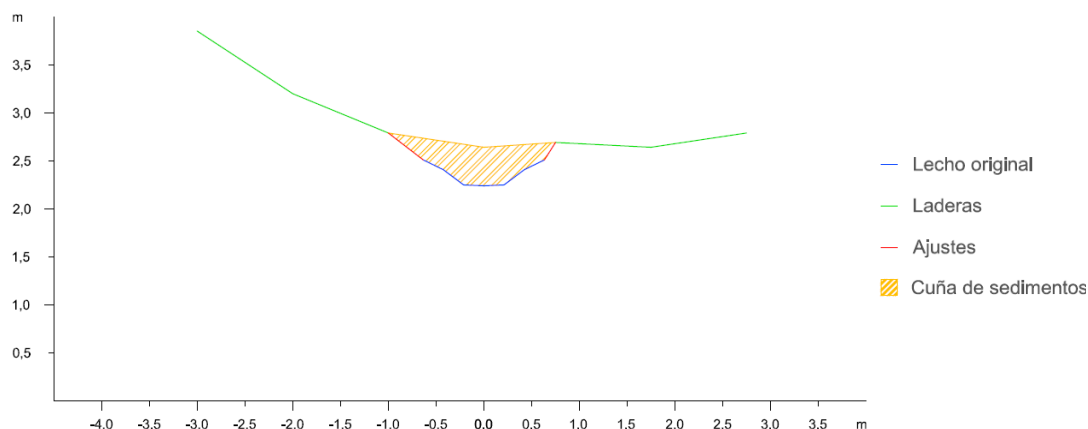


Figura A2.332. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 78

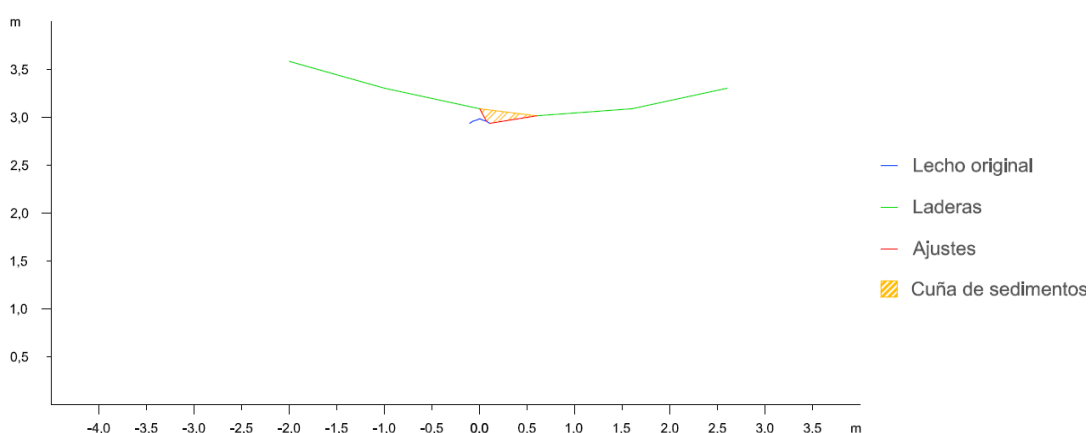


Figura A2.333. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 78

Dique 79

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 79 (Tabla A2.72) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.334 a A2.337).

Tabla A2.72. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 79

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	15,6957	11,6076	1	16,3060	15,0390
2		7,5195		3		
2	1,0	7,5195	5,3319	2	7,2956	6,2884
3		3,1442		4		
3	1,0	3,1442	2,4674	3	2,7483	2,8648
4		1,7905		Fin cuña		
4	0,60	1,7905	0,5372	Opción 1	19,0543	17,9038
Fin cuña		0,0000		Opción 2	19,4404	18,4332
Volumen total			19,9440		19,2473	18,1685
Errores				A ₁ = 0,6966		A ₂ = -1,0788



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

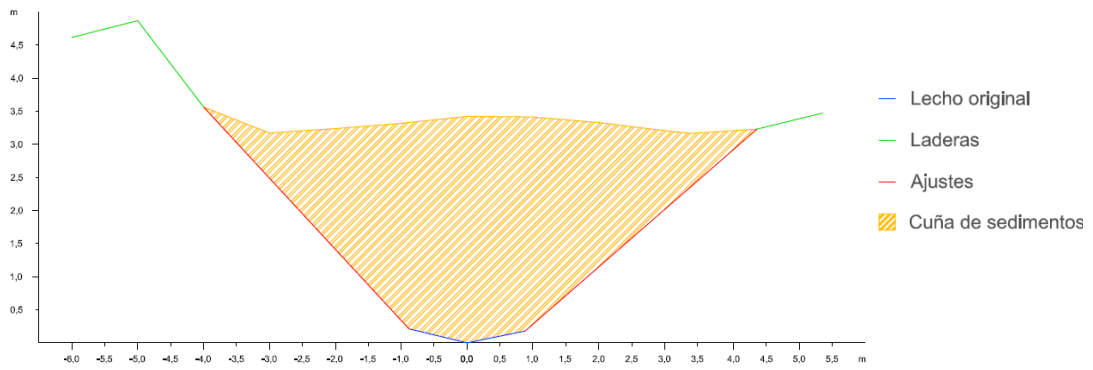


Figura A2.334. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 79

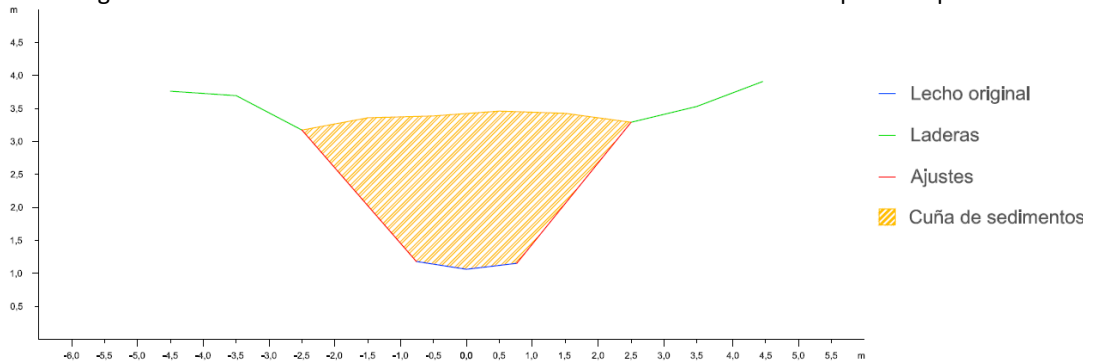


Figura A2.335. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 79

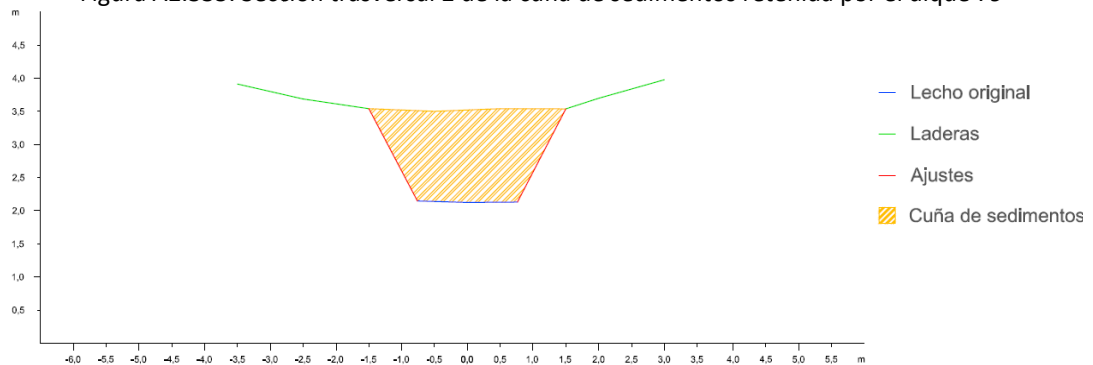


Figura A2.336. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 79

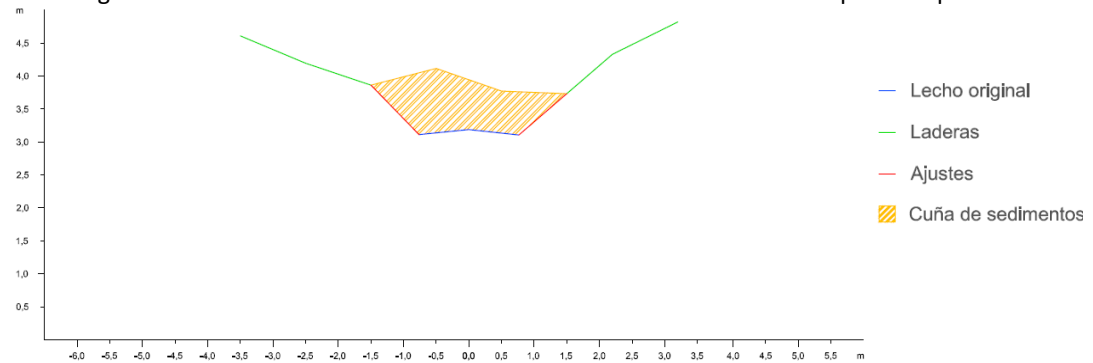


Figura A2.337. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 79

Dique 80

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 80 (Tabla A2.73) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.338 a A2.342).

Tabla A2.73. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 80

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	2,7483	2,2156	1	3,4519	3,3656
2		1,6828		3		
2	1,0	1,6828	1,2795	2	1,8546	1,7522
3		0,8761		4		
3	1,0	0,8761	0,6264	3	0,8532	0,7534
4		0,3767		5		
4	1,0	0,3767	0,2767	4	0,2348	0,2297
5		0,1767		Fin cuña		
5	0,3	0,1767	0,0265	Opción 1	4,3316	4,1455
Fin cuña		0,0000		Opción 2	4,3049	4,1975
Volumen total			4,4246		4,3183	4,1715
Errores			A ₁ = 0,1063		A ₂ = -0,1468	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

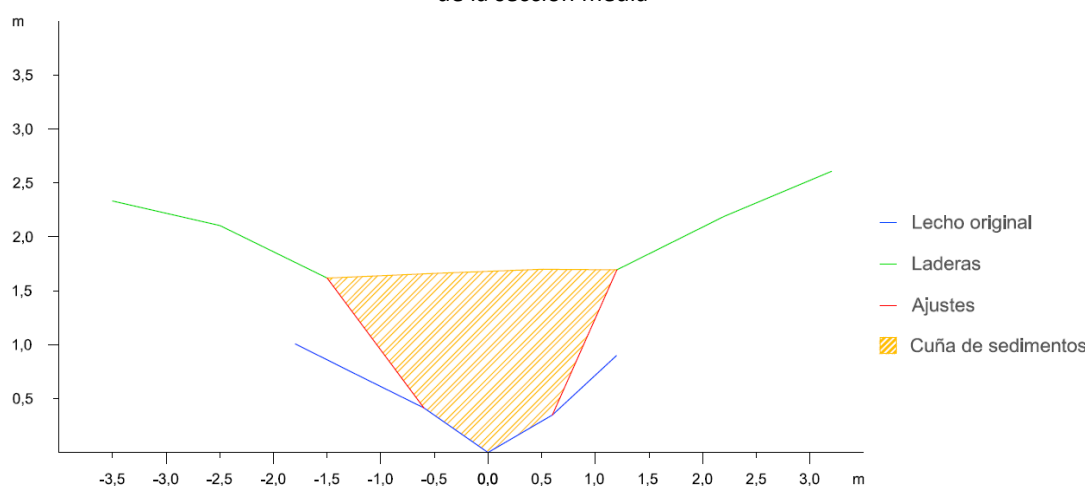


Figura A2.338. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 80

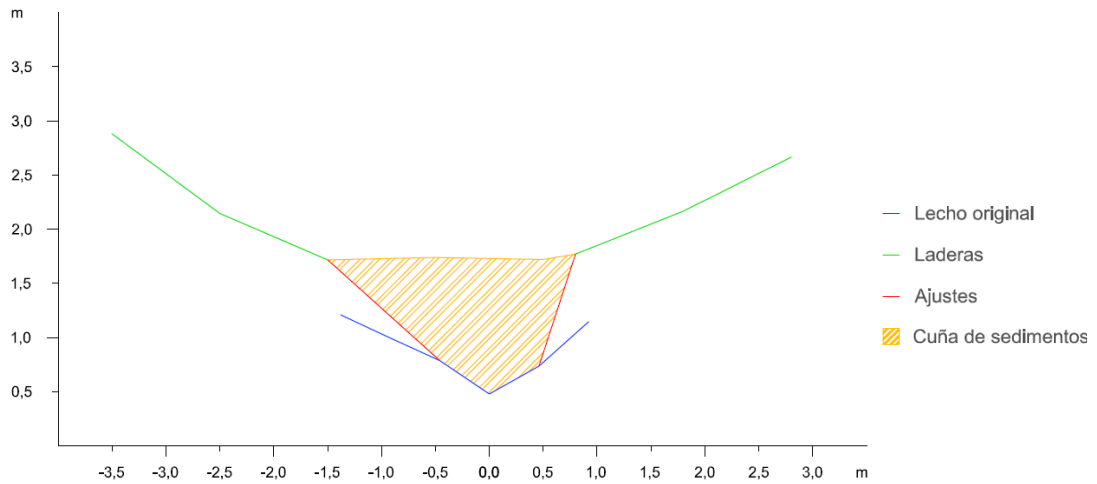


Figura A2.339. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 80

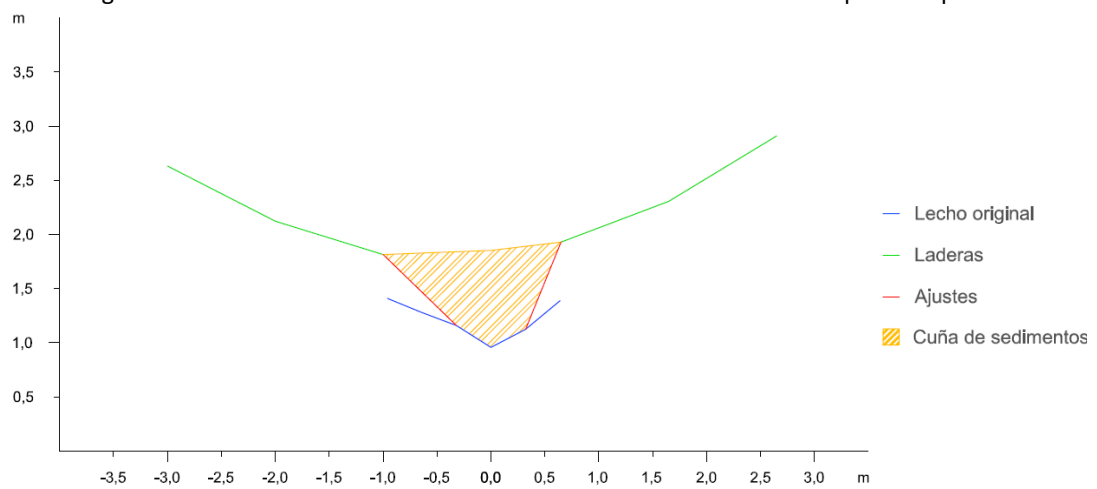


Figura A2.340. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 80

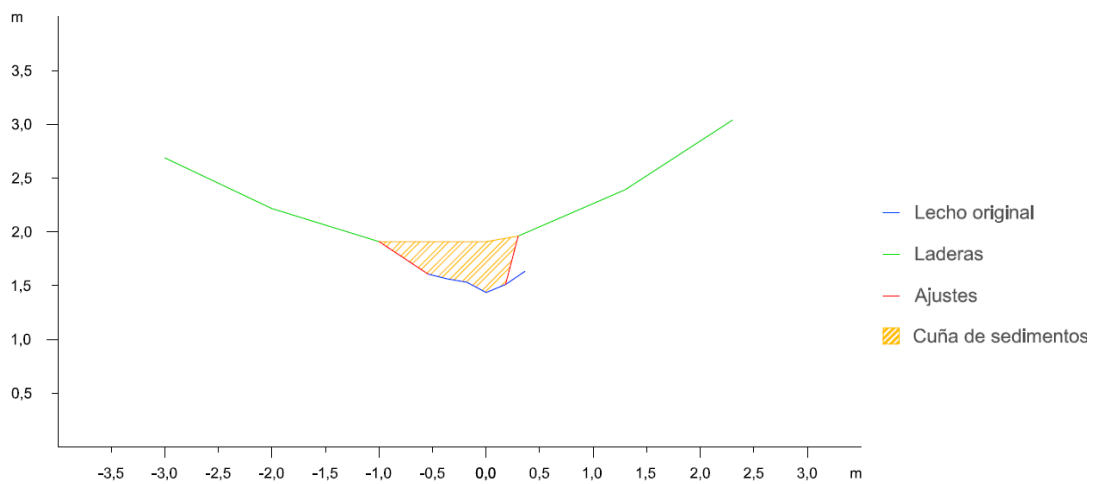


Figura A2.341. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 80

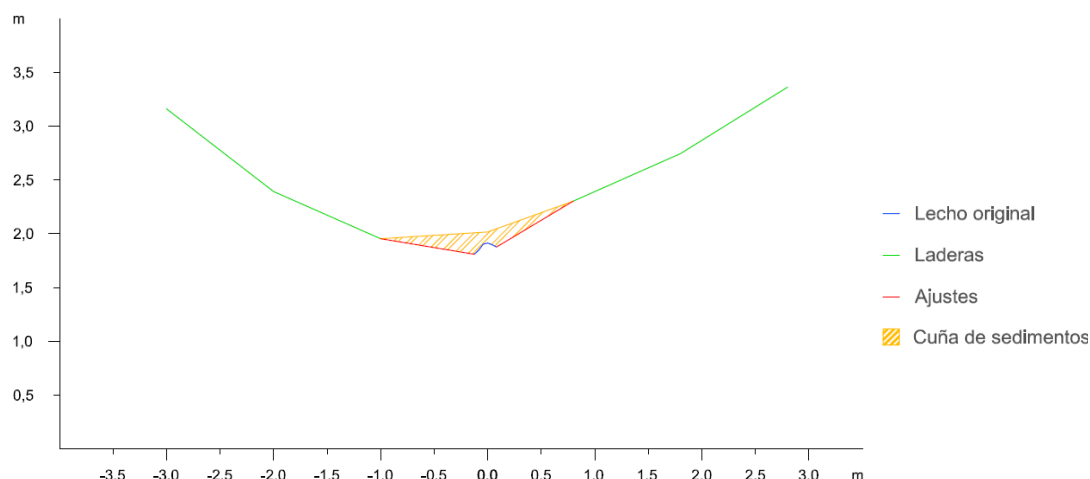


Figura A2.342. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 80

Dique 81

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 81 (Tabla A2.74) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.343 a A2.345).

Tabla A2.74. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 81

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	2,2784	1,5038	1	1,9086	1,4584
2		0,7292		3		
2	1,0	0,7292	0,6300	2	0,6655	0,7430
3		0,5307		Fin cuña		
3	0,40	0,5307	0,1061	Opción 1	2,0148	1,5645
Fin cuña		0,0000		Opción 2	2,1693	2,2468
Volumen total			2,23989		2,0920	1,9057
Errores			A ₁ = 0,1479		A ₂ = -0,1864	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

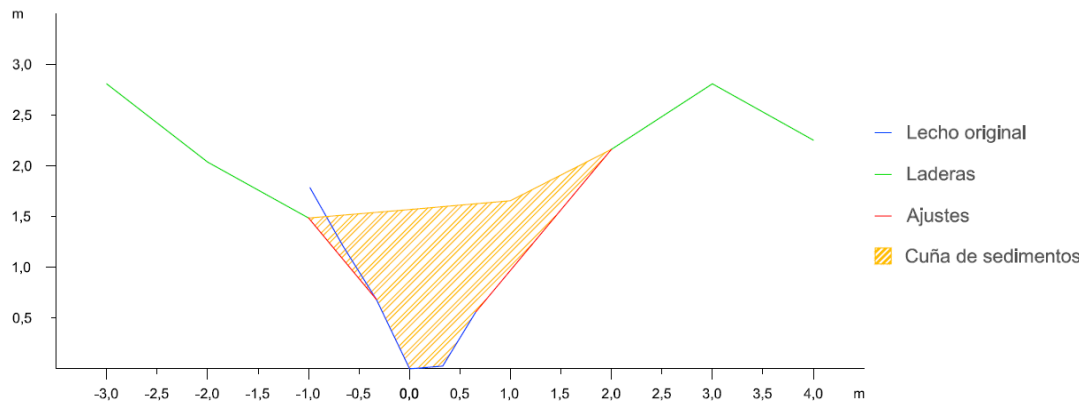


Figura A2.343. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 81

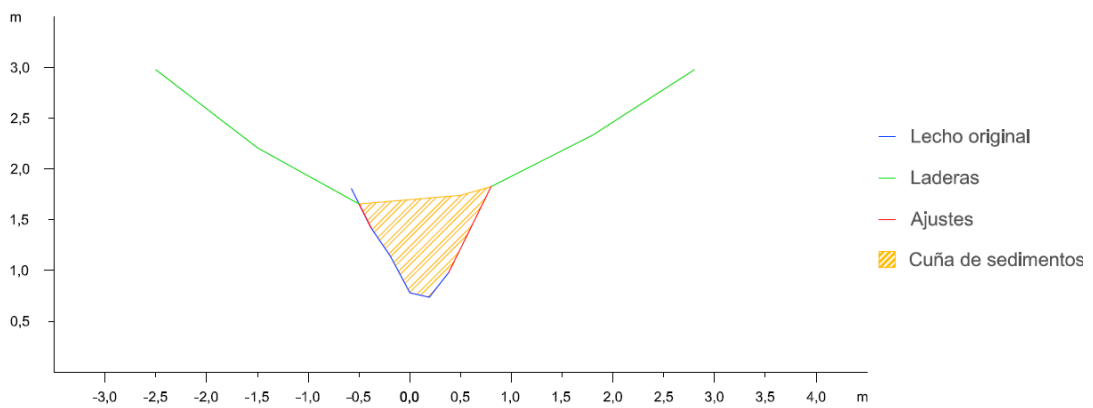


Figura A2.344. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 81

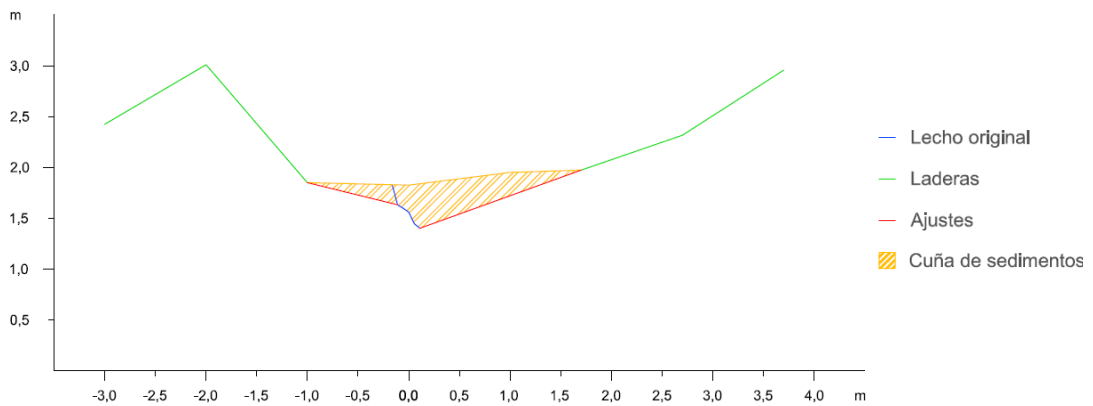


Figura A2.345. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 81

Dique 82

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 82 (Tabla A2.75) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.346 a A2.348).



Tabla A2.75. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 82

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	4,1138	3,0437	1	4,1562	3,9472
2		1,9736		3		
2	1,0	1,9736	1,2171	2	0,8903	0,6447
3		0,4605		Fin cuña		
3	0,40	0,4605	0,0921	Opción 1	4,2483	4,0393
Fin cuña		0,0000		Opción 2	3,9340	3,6884
Volumen total			4,35285		4,0912	3,8639
Errores			A₁= 0,2617		A₂= -0,2273	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

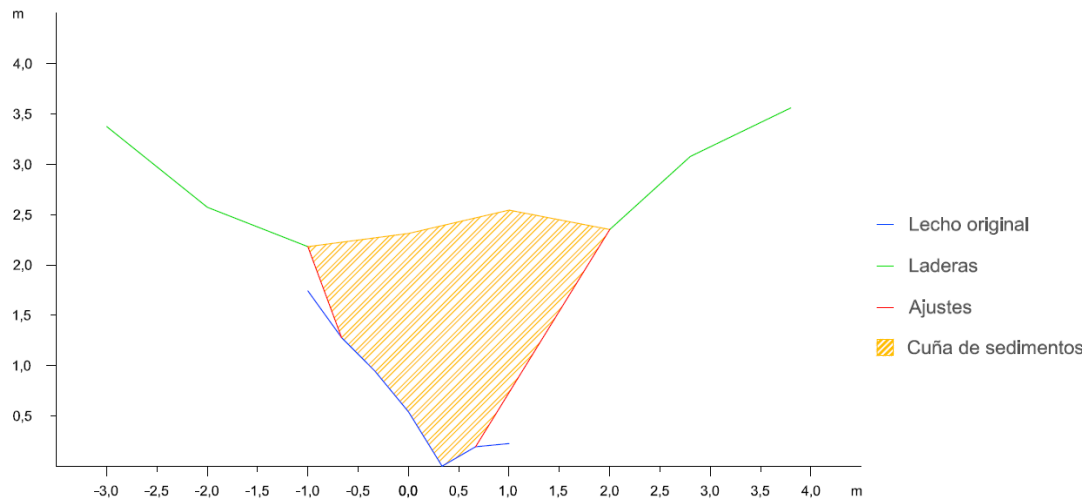


Figura A2.346. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 82

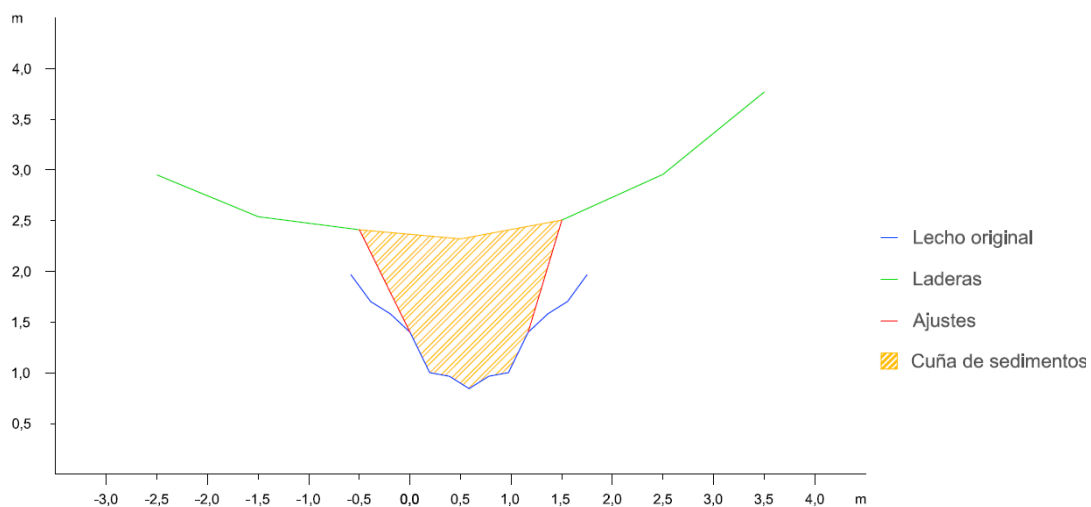


Figura A2.347. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 82

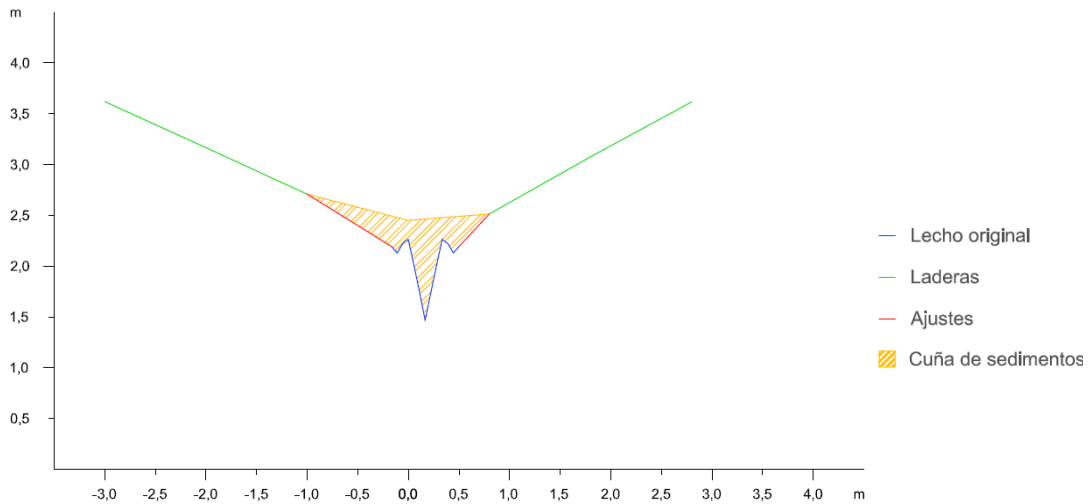


Figura A2.348. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 82

Dique 83

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 83 (Tabla A2.76) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.349 a A2.352).

Tabla A2.76. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 83

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	3,1042	2,0976	1	2,6352	2,1818
2		1,0909		3		
2	1,0	1,0909	0,7644	2	0,9531	0,8758
3		0,4379		4		
3	1,0	0,4379	0,2274	3	0,1180	0,0237
4		0,0169		Fin cuña		
4	0,40	0,0169	0,0034	Opción 1	2,7532	2,2055
Fin cuña		0,0000		Opción 2	3,0541	2,9767
Volumen total			3,0927		2,9036	2,5911
Errores			A ₁ = 0,1891		A ₂ = -0,3125	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

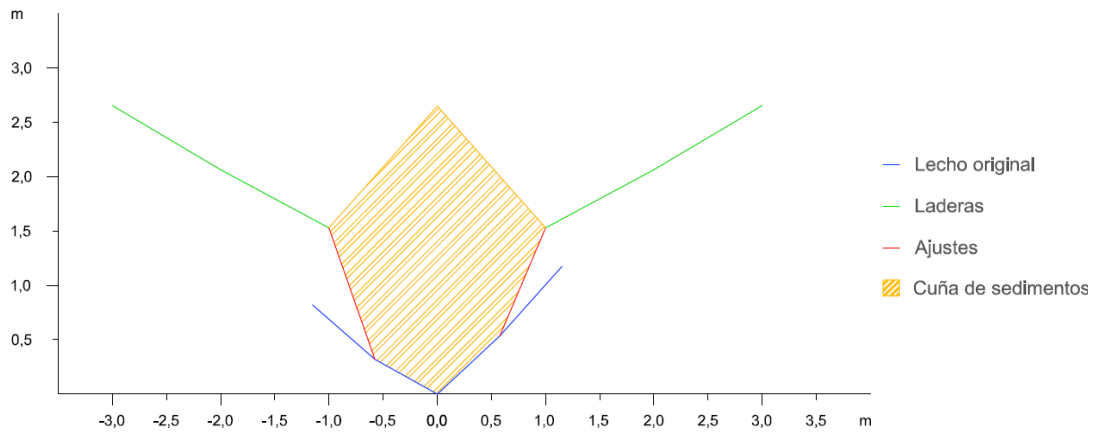


Figura A2.349. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 83

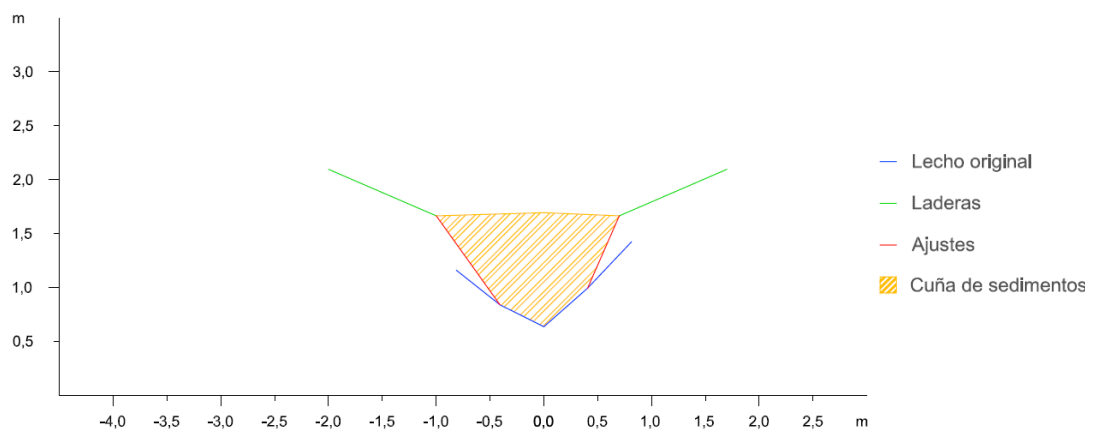


Figura A2.350. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 83

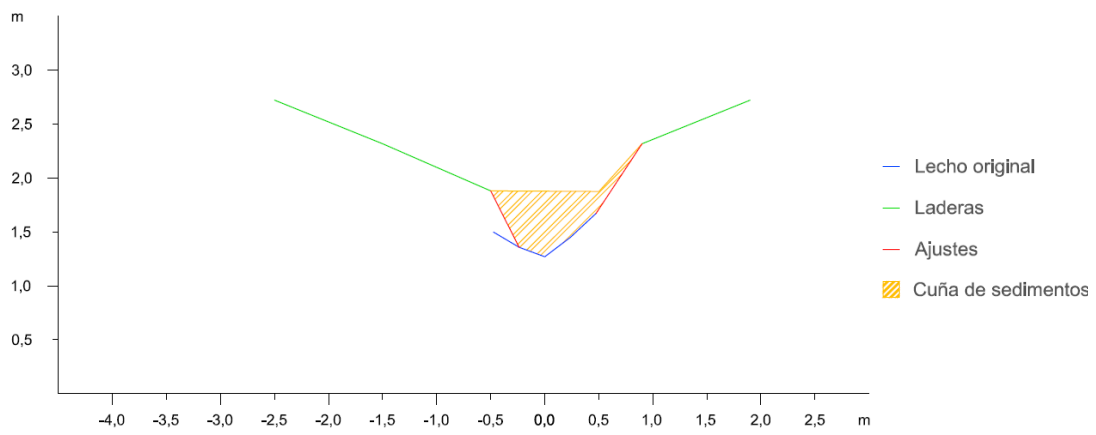


Figura A2.351. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 83

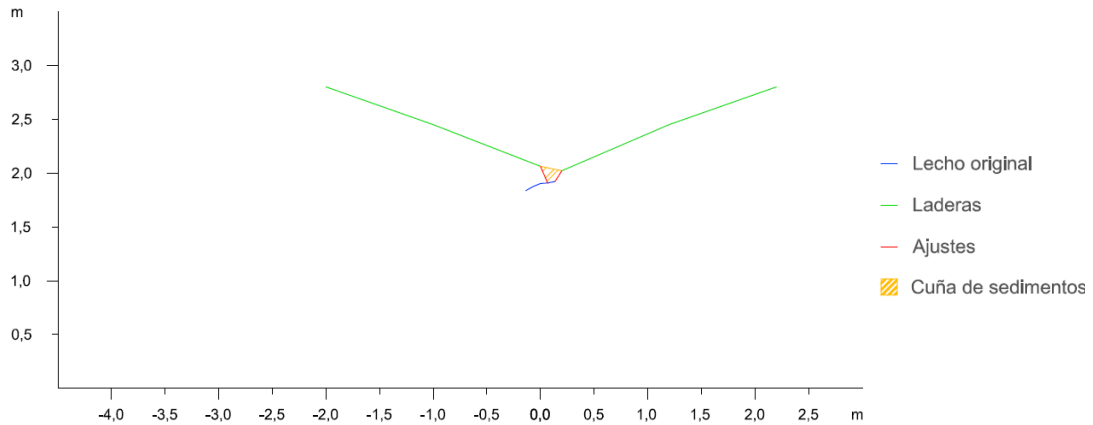


Figura A2.352. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 83

Dique 84

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 84 (Tabla A2.77) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.353 a A2.354).

Tabla A2.77. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 84

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	4,2849	2,8391	1	3,2859	2,7864
2		1,3932		3		
2	1,0	TOTAL	3,5357	Opción 1	—	—
Fin cuña		0,0000		Opción 2	—	—
Volumen total			3,53565		3,2859	2,7864
Errores			A ₁ = 0,2498		A ₂ = -0,4995	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

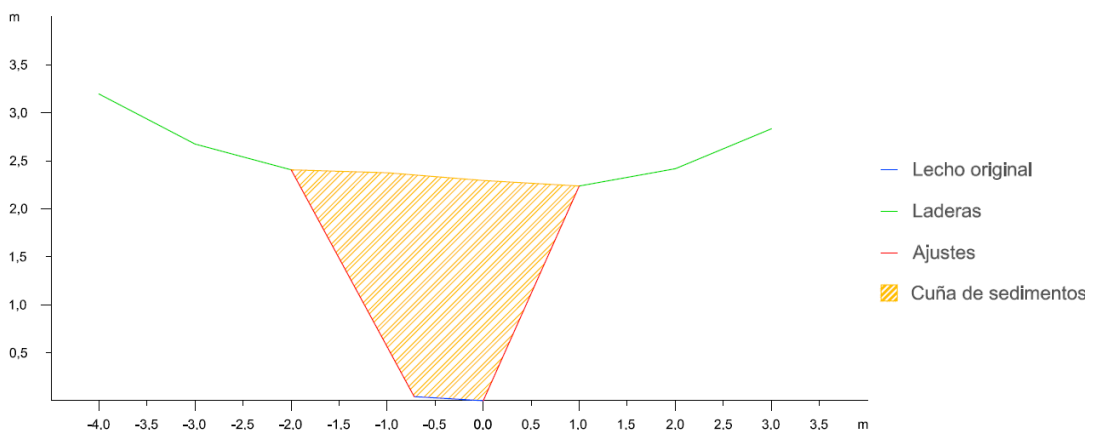


Figura A2.353. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 84

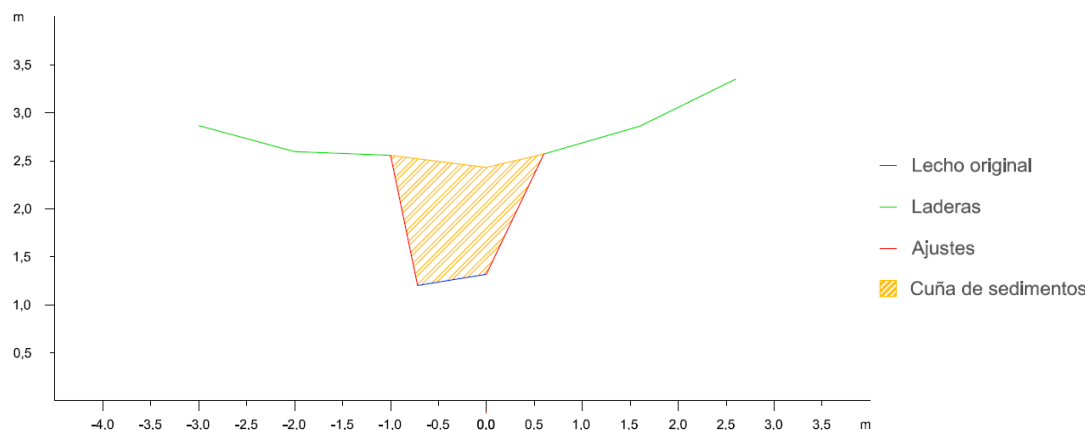


Figura A2.354. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 84

Dique 85

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 85 (Tabla A2.78) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.355 a A2.357).

Tabla A2.78. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 85

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	4,1138	3,0437	1	4,1562	3,9472
2		1,9736		3		
2	1,0	1,9736	1,2171	2	0,8903	0,6447
3		0,4605		Fin cuña		
3	0,40	0,4605	0,0921	Opción 1	4,2483	4,0393
Fin cuña		0,0000		Opción 2	3,9340	3,6884
Volumen total			4,35285		4,0912	3,8639
Errores			A₁ = 0,2617		A₂ = -0,2273	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

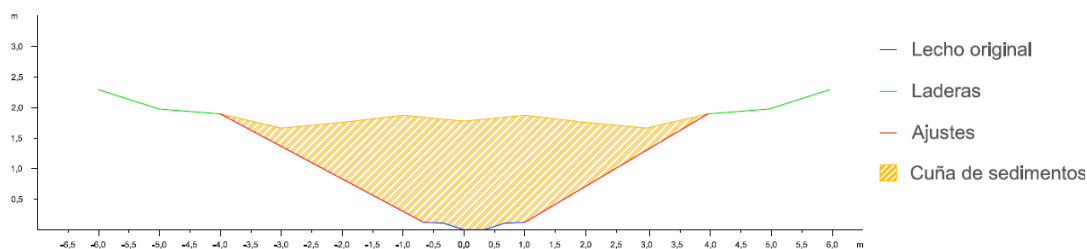


Figura A2.355. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 85

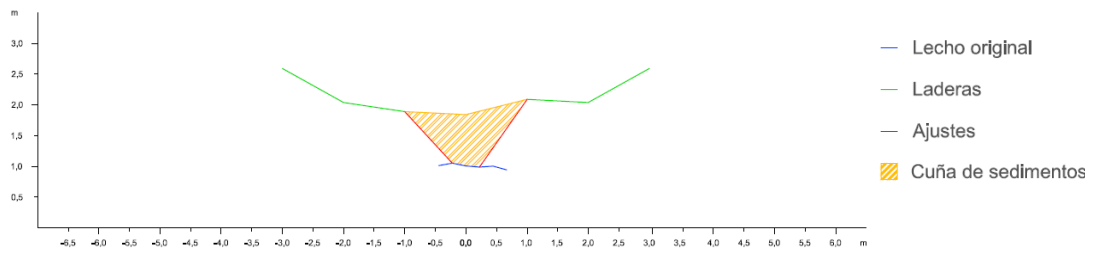


Figura A2.356. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 85

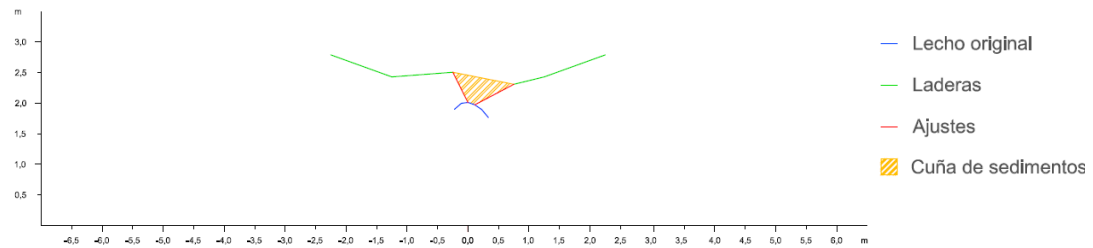


Figura A2.357. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 85

Dique 87

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 87 (Tabla A2.79) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.358 a A2.360).

Tabla A2.79. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 87

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	14,0339	22,6762	1	38,2795	34,5692
2		8,6423		3		
2	2,0	8,6423	17,4584	2	29,2711	35,2644
3		8,8161		Fin cuña		
3	2,00	8,8161	8,8161	Opción 1	47,0956	43,3853
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			48,9507			50,6630
Errores			A ₁ = -0,5707			A ₂ = 1,1415

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

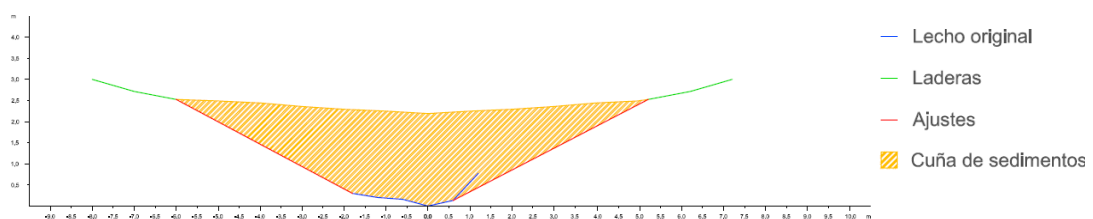


Figura A2.358. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 87

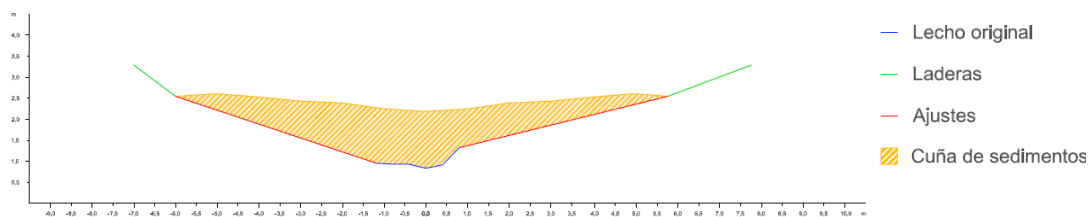


Figura A2.359. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 87

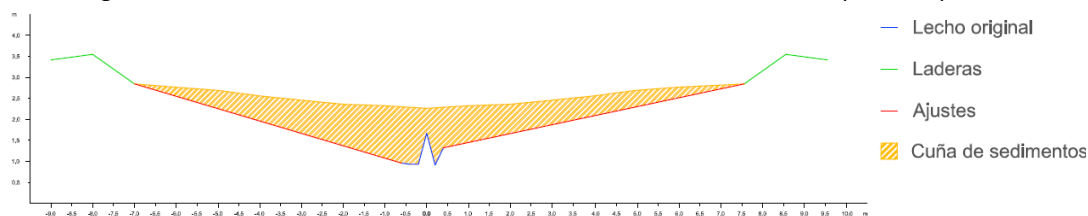


Figura A2.360. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 87

Dique 88

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 88 (Tabla A2.80) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.361 a A2.363).

Tabla A2.80. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 88

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	14,7203	20,9652	1	27,4991	24,9796
2		6,2449		3		
2	2,0	6,2449	7,7937	2	7,8787	5,8854
3		1,5488		Fin cuña		
3	1,80	1,5488	1,3939	Opción 1	28,8931	26,3735
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			30,15282		28,8685	26,6121
Errores			A ₁ = 1,2843		A ₂ = -2,2564	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

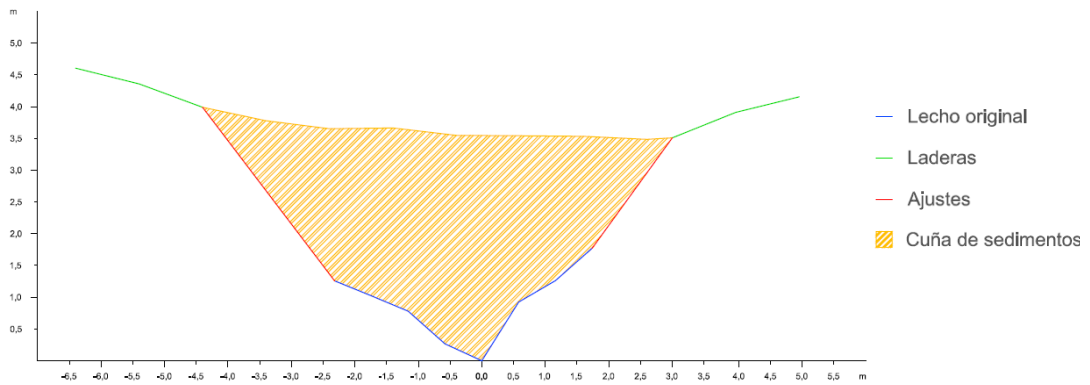


Figura A2.361. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 88

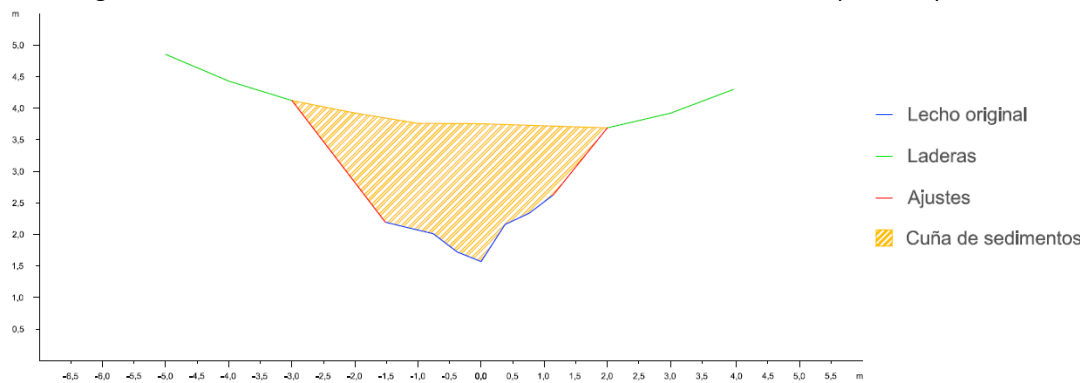


Figura A2.362. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 88

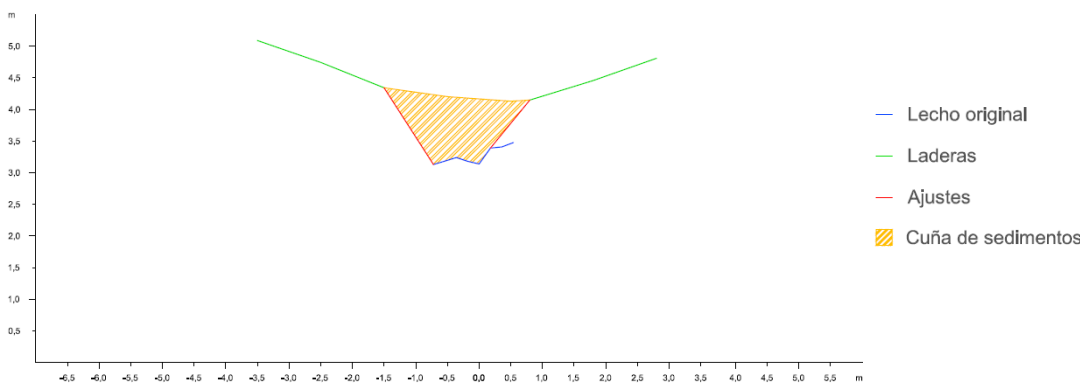


Figura A2.363. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 88

Dique 89

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 89 (Tabla A2.81) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.364 a A2.366).



Tabla A2.81. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 89

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	4,3012	5,9189	1	7,4053	6,4708
2		1,6177		3		
2	2,0	1,6177	1,9537	2	1,9251	1,3104
3		0,3360		Fin cuña		
3	1,90	0,3360	0,3192	Opción 1	7,7245	6,7900
Fin cuña		0,0000		Opción 2	7,8440	7,2293
Volumen total			8,1918		7,7843	7,0097
Errores			A ₁ = 0,4075		A ₂ = -0,7746	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

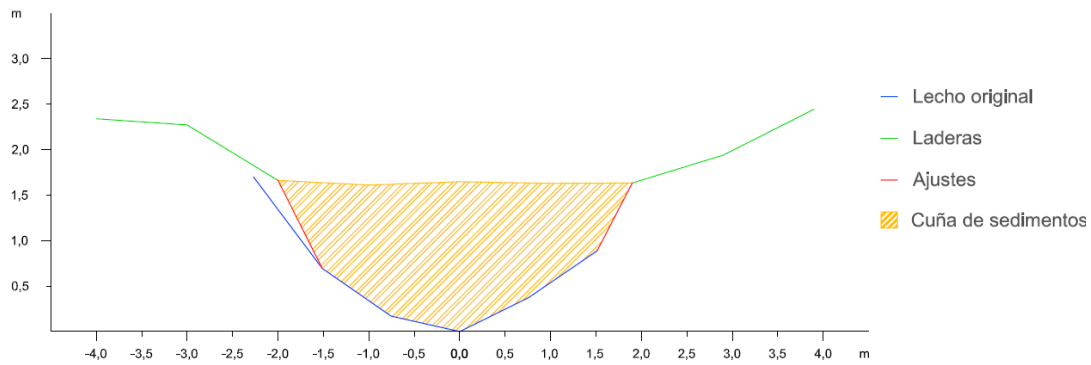


Figura A2.364. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 89

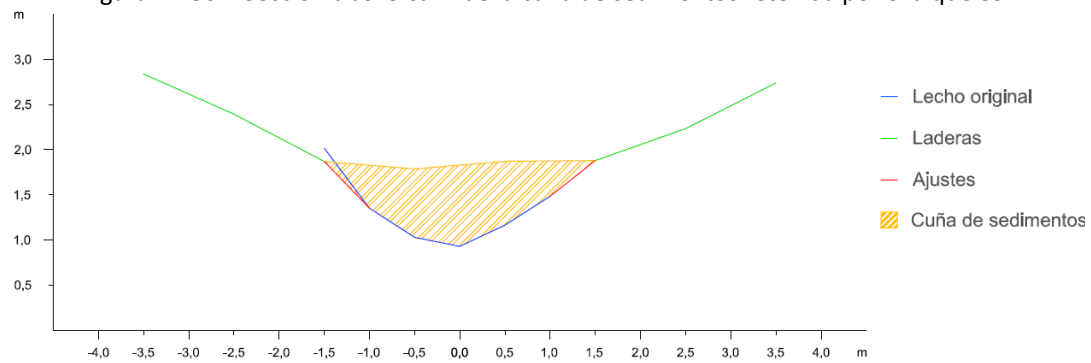


Figura A2.365. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 89

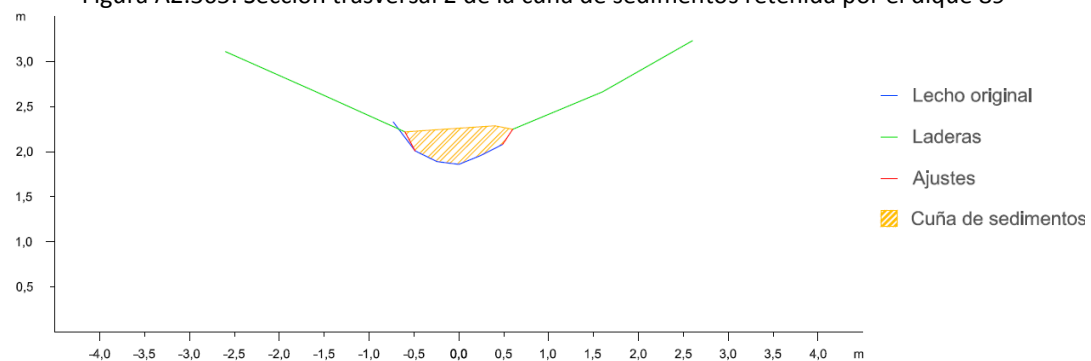


Figura A2.366. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 89

Dique 90

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 90 (Tabla A2.82) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.367 a A2.370).

Tabla A2.82. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 90

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	8,5668	6,9577	1	10,9627	10,6972
2		5,3486		3		
2	1,0	5,3486	4,1377	2	6,2133	5,8536
3		2,9268		4		
3	1,0	2,9268	2,2555	3	3,5510	3,6437
4		1,5842		Fin cuña		
4	1,30	1,5842	1,0297	Opción 1	14,5137	14,3409
Fin cuña		0,0000		Opción 2	14,2008	13,8410
Volumen total			14,3806		14,3572	14,0909
Errores			A ₁ = 0,0234	A ₂ = -0,2663		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

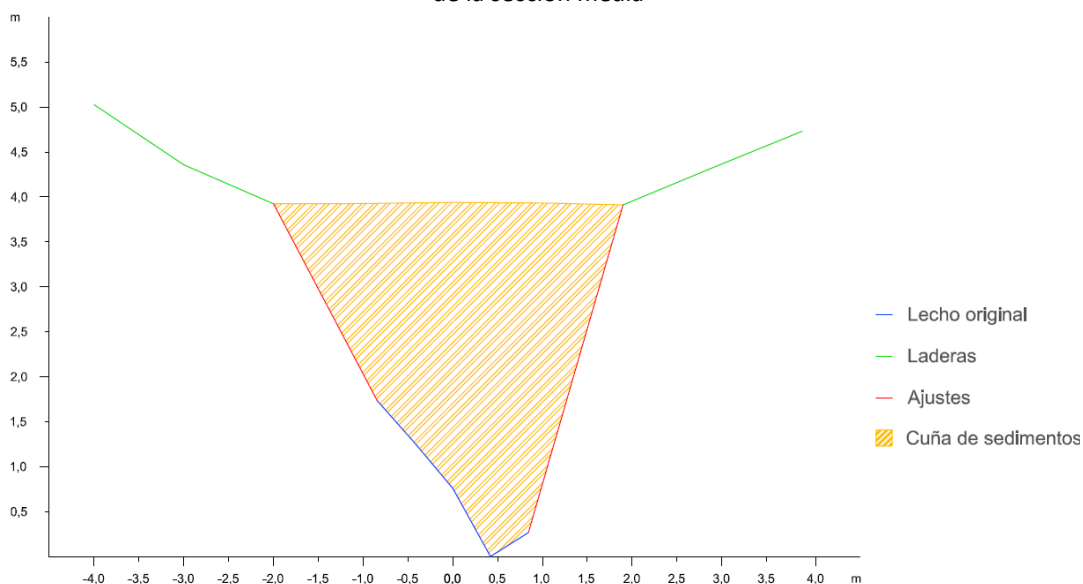


Figura A2.367. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 90

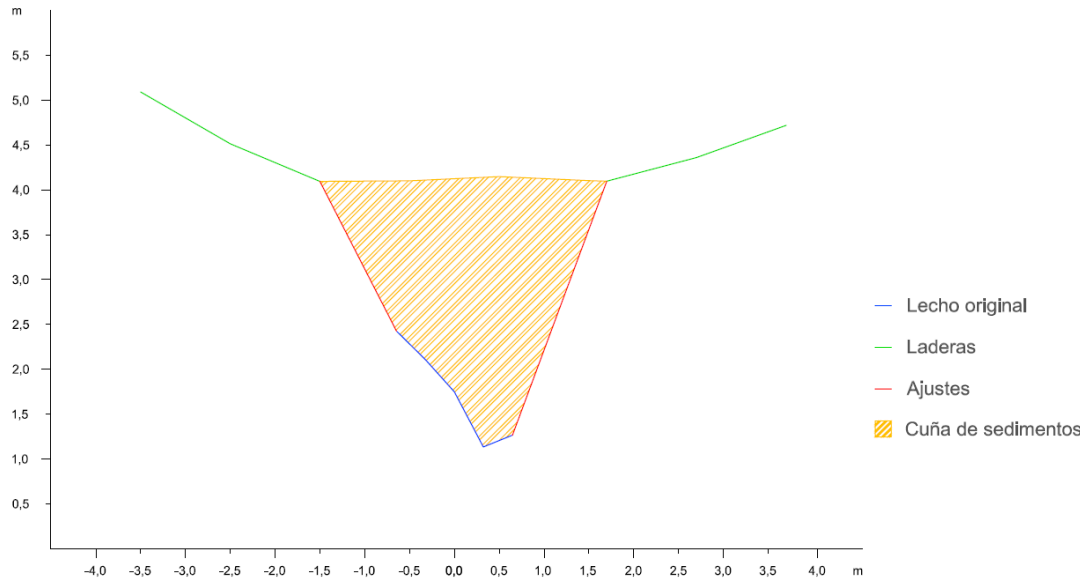


Figura A2.368. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 90

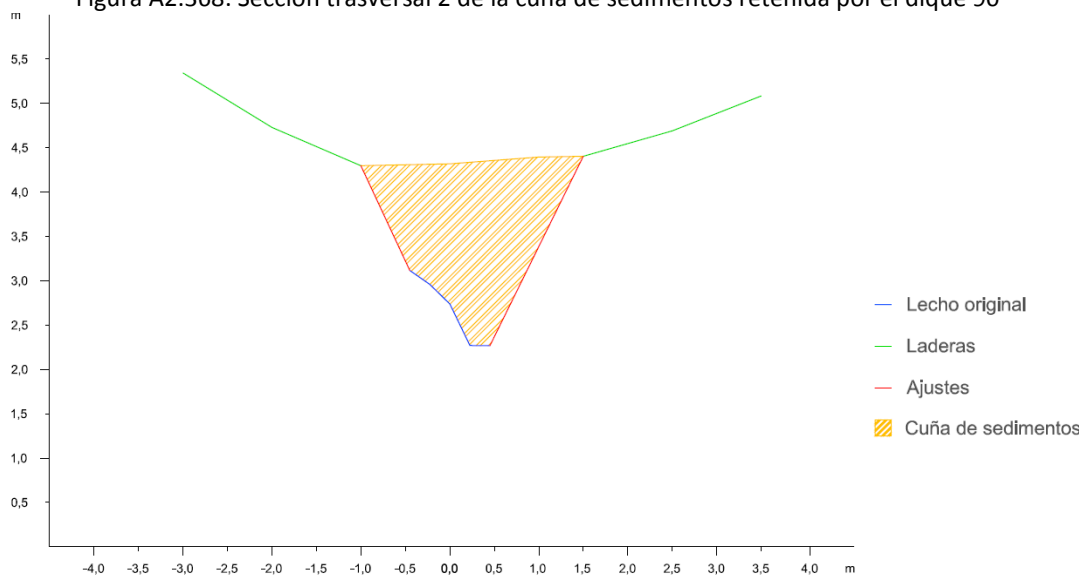


Figura A2.369. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 90

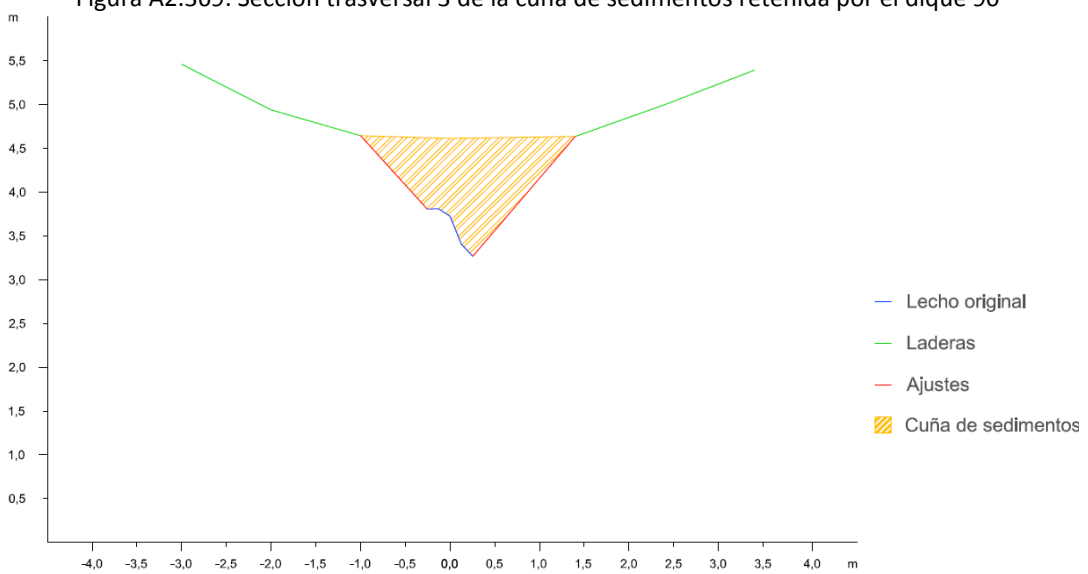


Figura A2.370. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 90

Dique 91

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 91 (Tabla A2.83) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.371 a A2.372).

Tabla A2.83. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 91

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	2,8298	1,7966	1	1,2747	0,9923
2		0,7633		3		
2	0,3	TOTAL	1,9110	Opción 1	—	—
Fin cuña		0,0000		Opción 2	—	—
Volumen total			1,911045		1,2747	0,9923
Errores			A ₁ = 0,6364		A ₂ = -0,2824	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

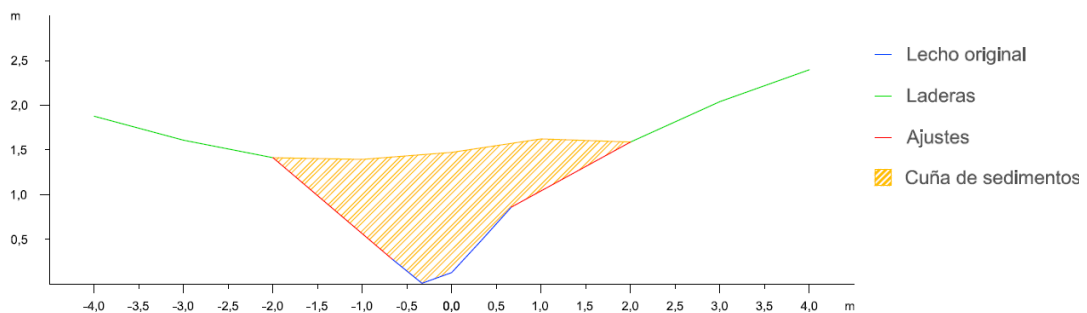


Figura A2.371. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 91

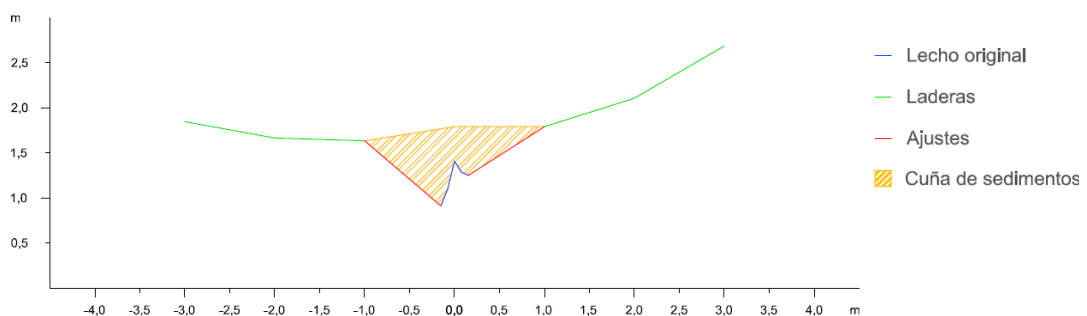


Figura A2.372. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 91

Dique 92

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el



dique 92 (Tabla A2.84) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.373 a A2.376).

Tabla A2.84. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 92

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	15,6036	22,3153	1	30,5190	26,8468
2		6,7117		3		
2	2,0	6,7117	10,0398	2	13,9279	13,3124
3		3,3281		4		
3	2,0	3,3281	4,1959	3	3,9663	3,0373
4		0,8678		Fin cuña		
4	1,50	0,8678	0,6509	Opción 1	34,4853	29,8841
Fin cuña		0,0000		Opción 2	36,8941	36,2786
Volumen total			37,2019		35,6897	33,0813
Errores			A₁= 1,5122		A₂= -2,6083	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

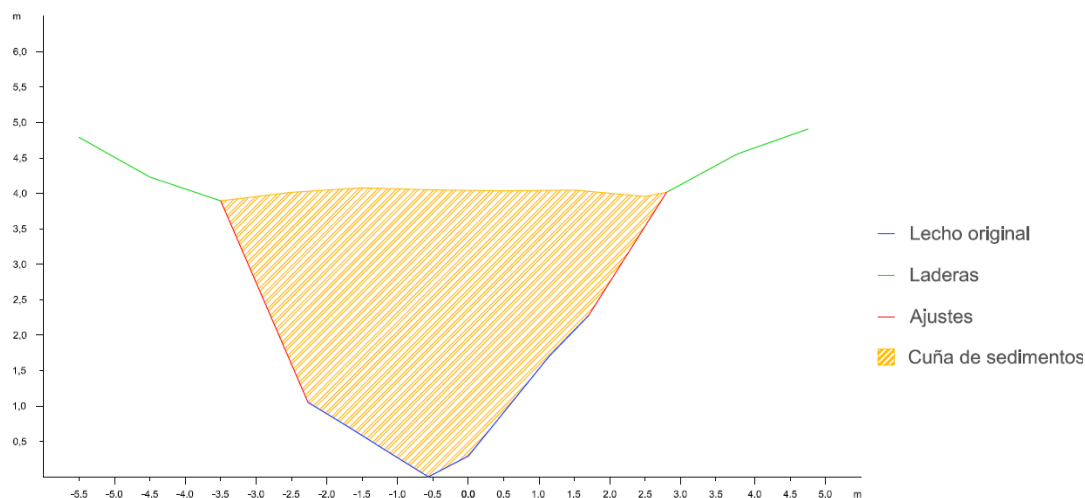


Figura A2.373. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 92

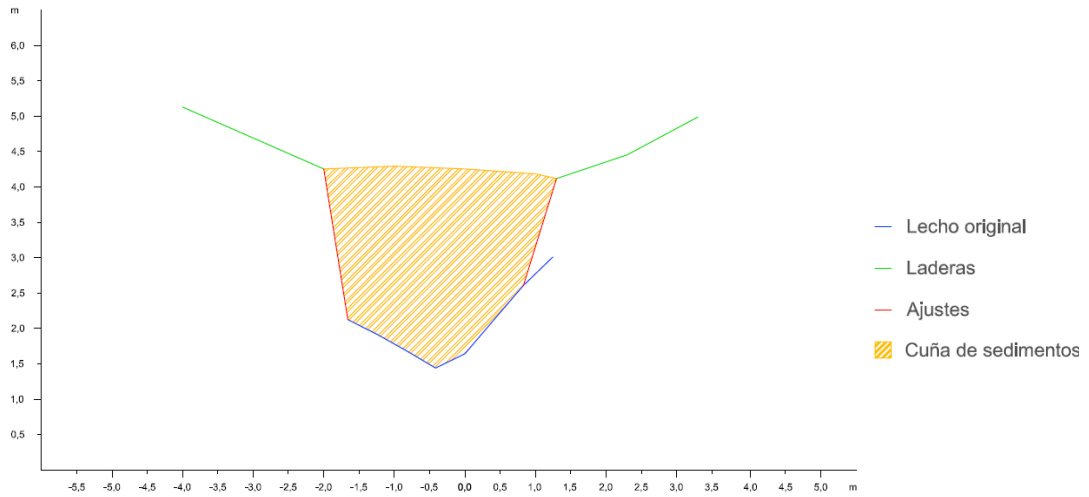


Figura A2.374. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 92

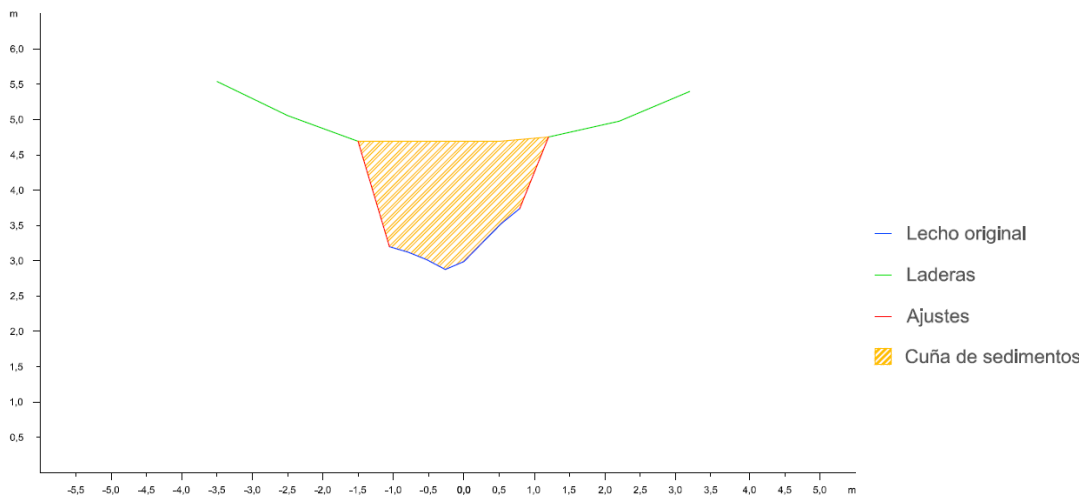


Figura A2.375. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 92

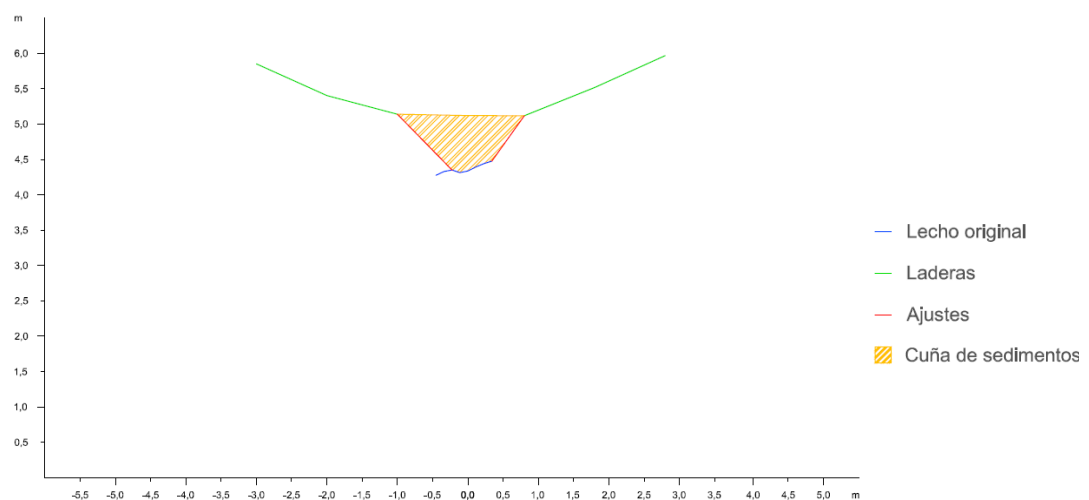


Figura A2.376. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 92

Dique 93

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el



dique 93 (Tabla A2.85) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.377 a A2.379).

Tabla A2.85. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 93

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	8,8771	11,7941	1	14,1257	11,6680
2		2,9170		3		
2	2,0	2,9170	3,5604	2	3,6604	2,5736
3		0,6434		Fin cuña		
3	1,35	0,6434	0,4343	Opción 1	14,5600	12,1023
Fin cuña		0,0000		Opción 2	15,4545	14,3677
Volumen total			15,788795		15,0072	13,2350
Errores			A ₁ = 0,7816		A ₂ = -1,7722	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

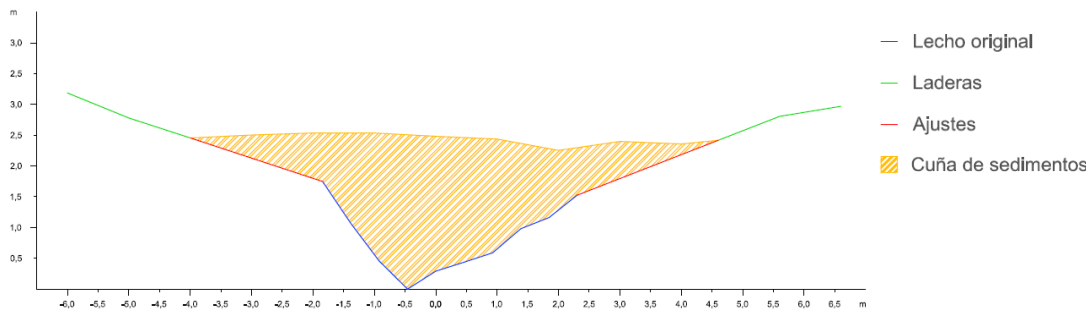


Figura A2.377. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 93

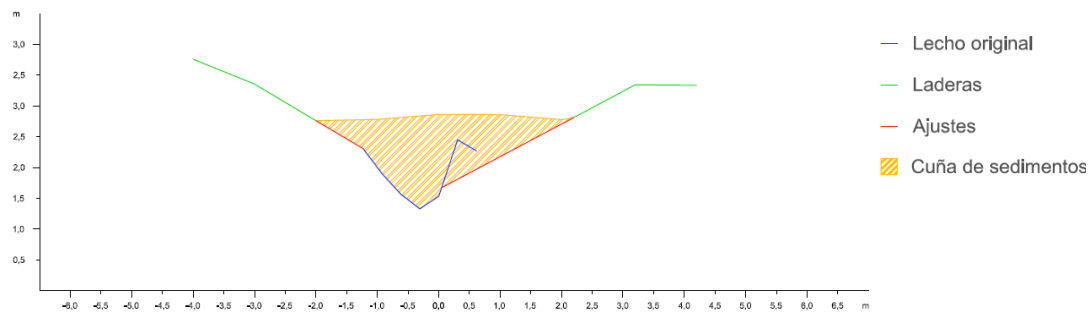


Figura A2.378. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 93

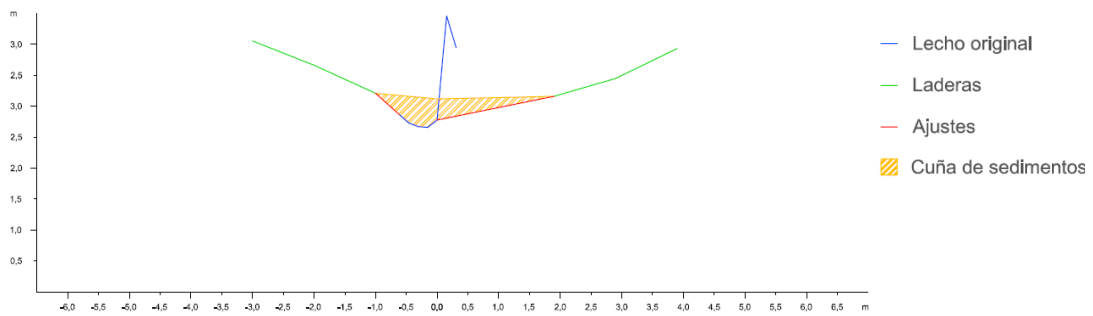


Figura A2.379. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 93

Dique 94

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 94 (Tabla A2.86) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.380 a A2.382).

Tabla A2.86. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 94

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	1,0	12,5085	9,8906	1	14,1532	14,5452
2		7,2726		3		
2	1,0	7,2726	4,0667	2	2,1432	1,0330
3		0,8608		Fin cuña		
3	0,20	0,8608	0,0861	Opción 1	14,2393	14,6313
Fin cuña		0,0000		Opción 2	12,0337	10,9235
Volumen total			14,04333		13,1365	12,7774
Errores			A ₁ = 0,9068		A ₂ = -0,3591	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

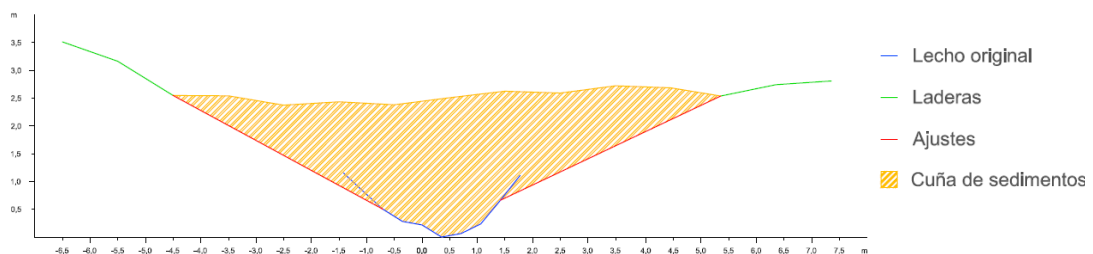


Figura A2.380. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 94

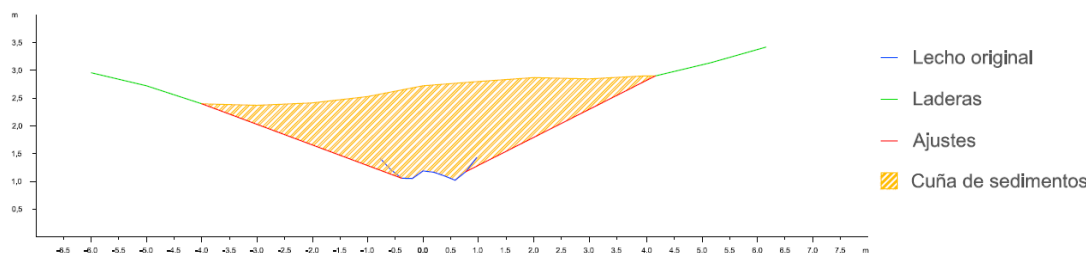


Figura A2.381. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 94

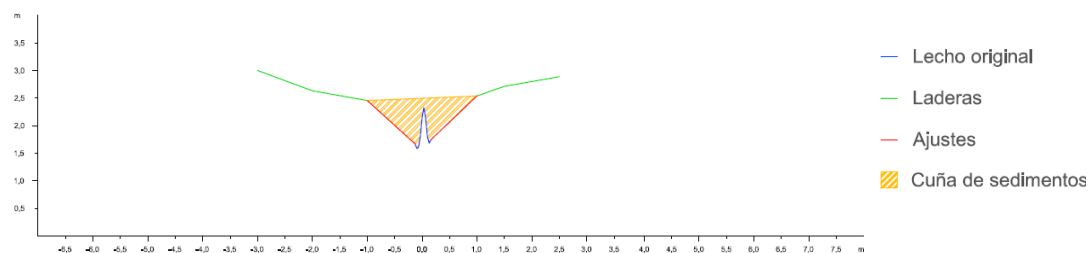


Figura A2.382. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 94

Dique 95

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 95 (Tabla A2.87) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.383 a A2.386).

Tabla A2.87. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 95

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	13,9443	21,0971	1	30,7602	28,6112
2		7,1528		3		
2	2,0	7,1528	10,7376	2	14,4138	14,3392
3		3,5848		4		
3	2,0	3,5848	3,7135	3	1,8448	0,3475
4		0,1287		Fin cuña		
4	0,70	0,1287	0,0450	Opción 1	32,6050	28,9587
Fin cuña		0,0000		Opción 2	35,5559	35,4813
Volumen total			35,5932		34,0805	32,2200
Errores			A ₁ = 1,5128		A ₂ = -1,8605	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

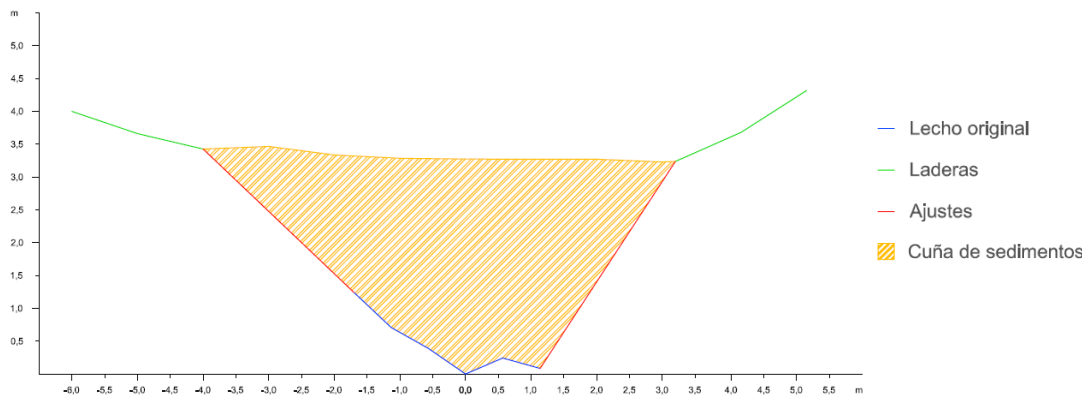


Figura A2.383. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 95

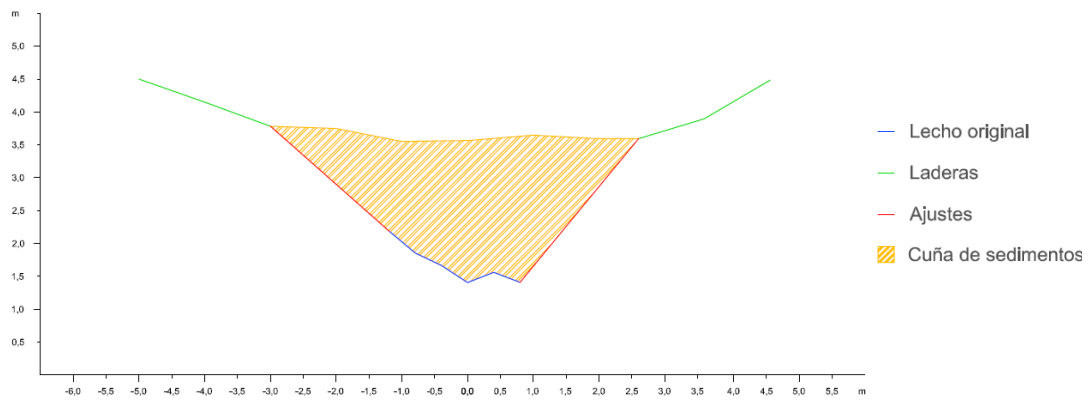


Figura A2.384. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 95

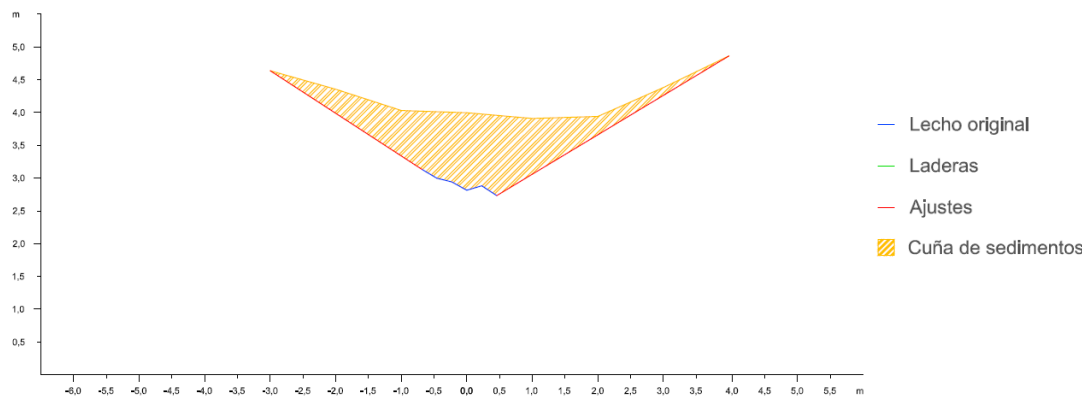


Figura A2.385. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 95

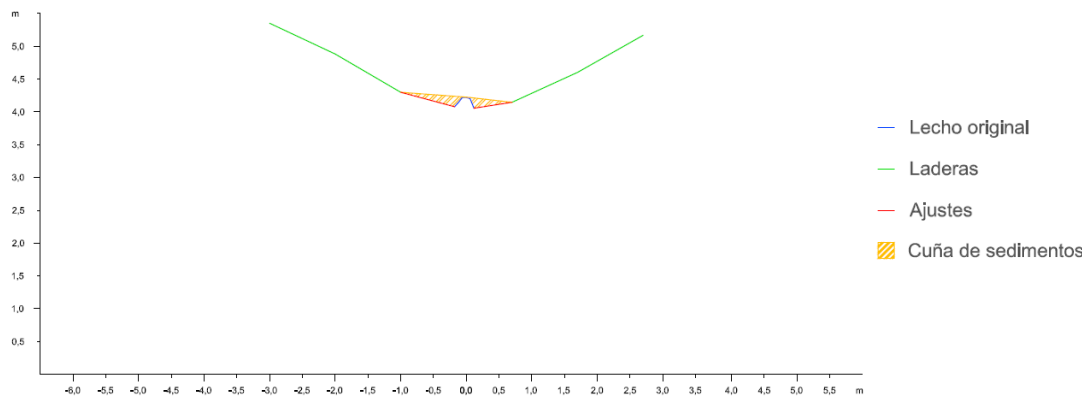


Figura A2.386. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 95



Dique 96

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 96 (Tabla A2.88) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.387 a A2.389).

Tabla A2.88. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 96

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	5,1587	11,3513	1	15,7232	14,4528
2		2,4088		3		
2	3,0	2,4088	5,0072	2	4,0840	3,7172
3		0,9293		Fin cuña		
3	1,00	0,9293	0,4647	Opción 1	16,1879	14,9175
Fin cuña		0,0000		Opción 2	15,4353	15,0685
Volumen total			16,82305		15,8116	14,9930
Errores			A₁= 1,0115		A₂= -0,8186	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

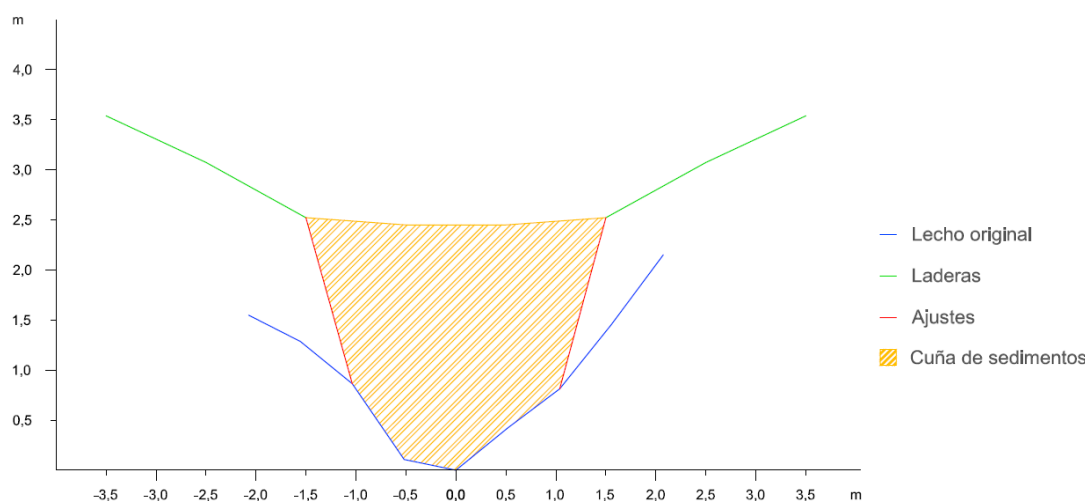


Figura A2.387. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 96

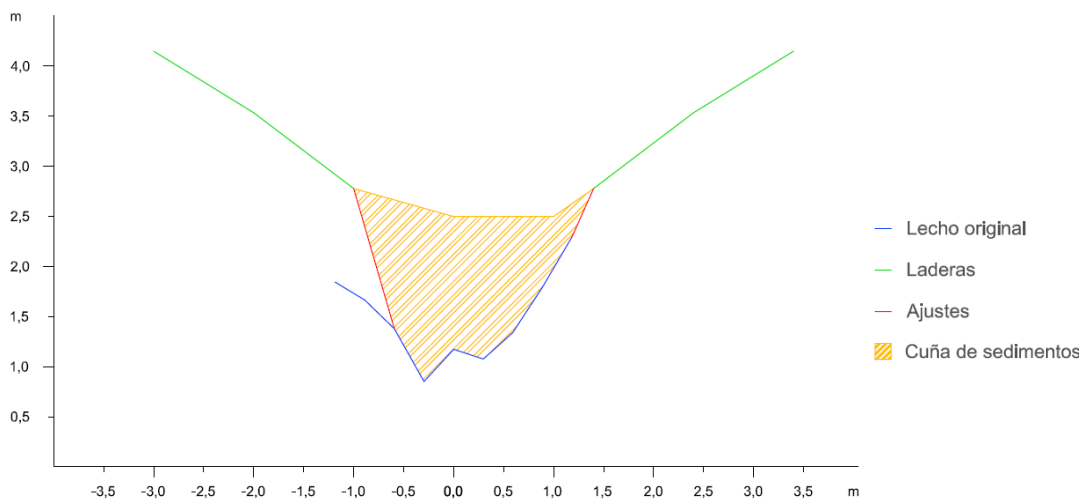


Figura A2.388. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 96

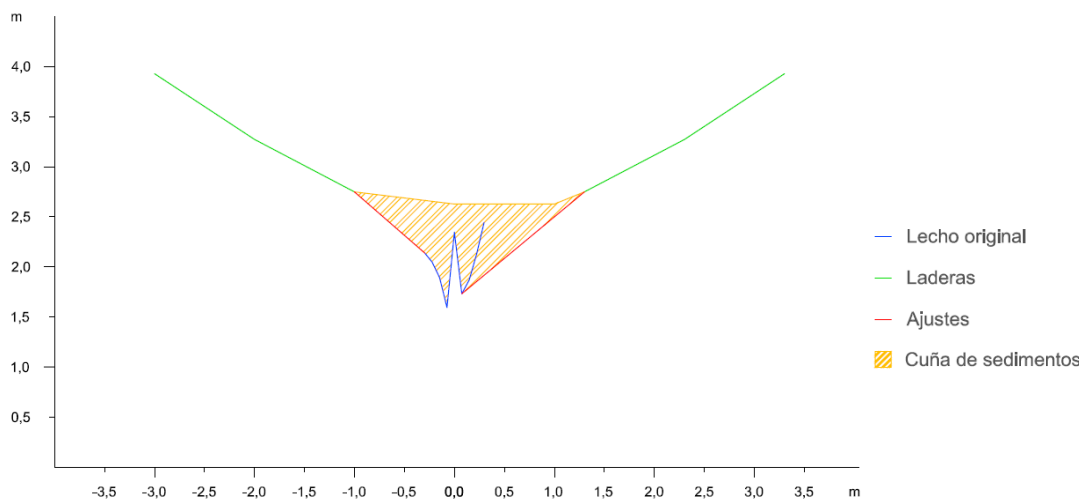


Figura A2.389. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 96

Dique 97

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 97 (Tabla A2.89) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.390 a A2.393).



Tabla A2.89. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 97

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	2,6848	6,0600	1	8,5675	8,1312
2		1,3552		3		
2	3,0	1,3552	2,7257	2	3,3064	2,7714
3		0,4619		4		
3	3,0	0,4619	0,8483	3	0,7303	0,5180
4		0,1036		Fin cuña		
4	2,00	0,1036	0,1036	Opción 1	9,2978	8,6492
Fin cuña		0,0000		Opción 2	9,4700	8,9350
Volumen total			9,7375		9,3839	8,7921
Errores			A ₁ = 0,3536	A ₂ = -0,5918		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

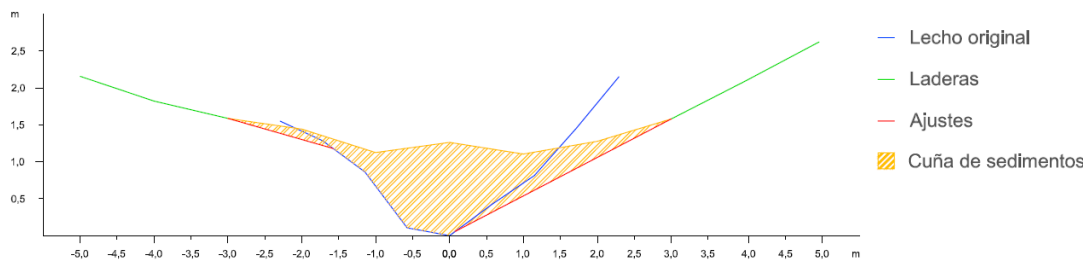


Figura A2.390. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 97

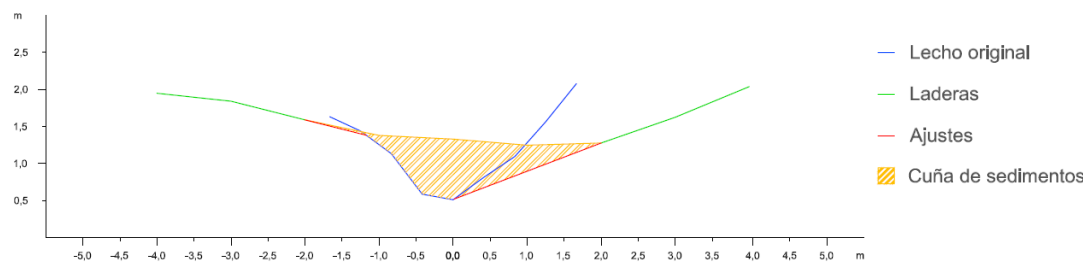


Figura A2.391. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 97

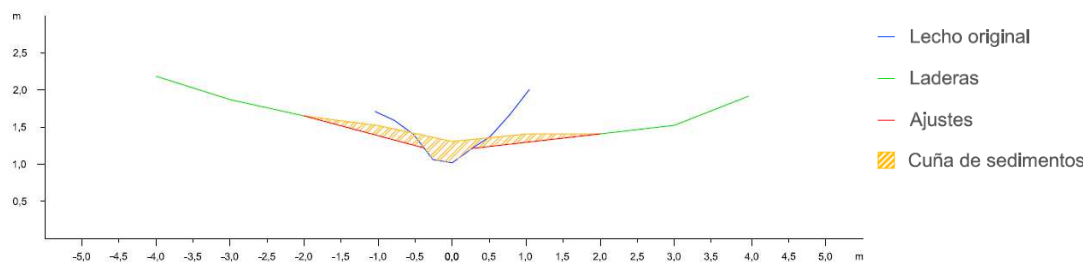


Figura A2.392. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 97

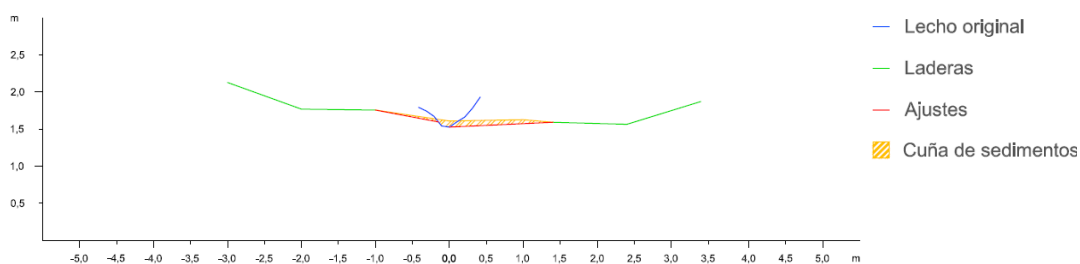


Figura A2.393. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 97

Dique 98

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 98 (Tabla A2.90) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.394 a A2.400).

Tabla A2.90. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		19,2520		1		
2	1,0	14,0458	16,6489	3	27,8584333	28,0916
2		14,0458		2		
3	1,0	8,1401	11,0930	4	17,6148667	16,2802
3		8,1401		3		
4	1,0	6,2384	7,1893	5	12,3517333	12,4768
4		6,2384		4		
5	1,0	3,9615	5,1000	6	8,58816667	7,923
5		3,9615		5		
6	1,0	3,6801	3,8208	7	6,32846667	7,3602
6		3,6801		6		
7	1,0	0,3035	1,9918	Fin	1,46823	0,5463
7		0,3035		Opción 1	46,6600333	48,05
Fin	0,8	0,0000	0,1214	Opción 2	44,3201633	41,3984
Volumen total			45,96505		45,4900983	44,7242
Errores			A ₁ = 0,4750		A ₂ = -0,7659	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

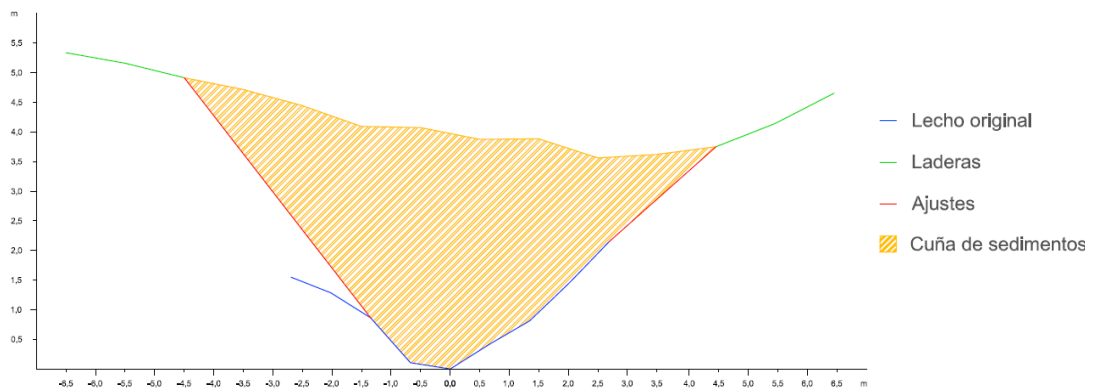


Figura A2.394. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

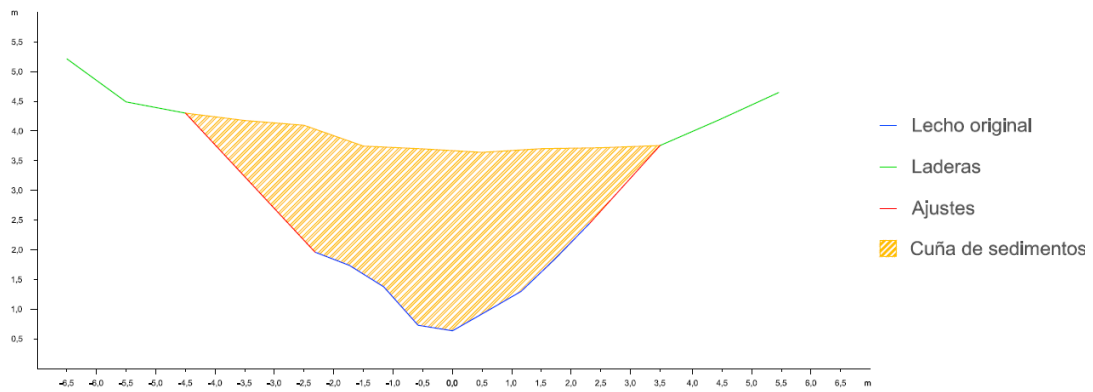


Figura A2.395. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

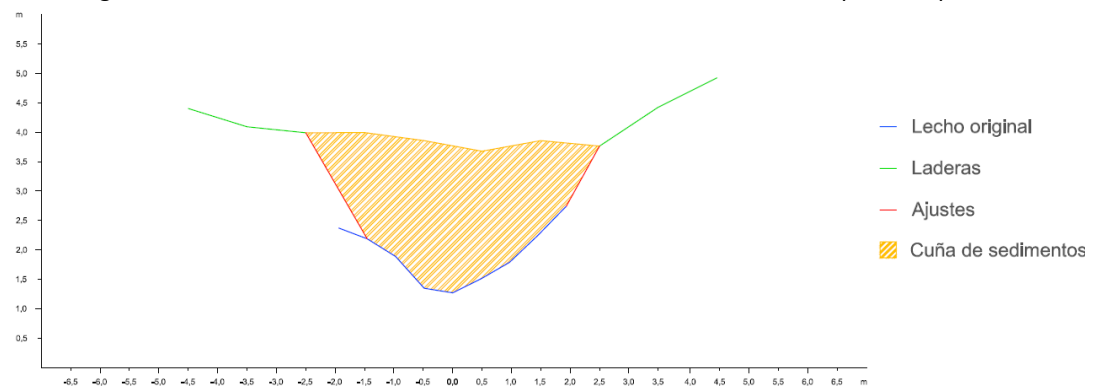


Figura A2.396. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

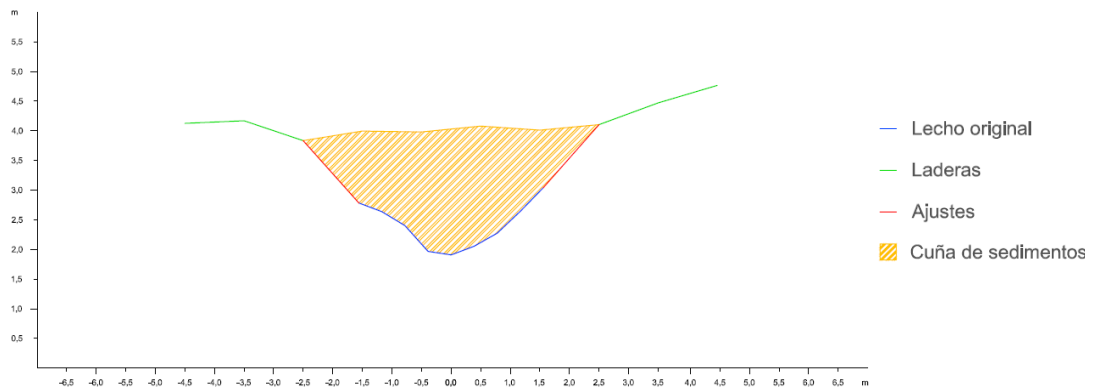


Figura A2.397. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

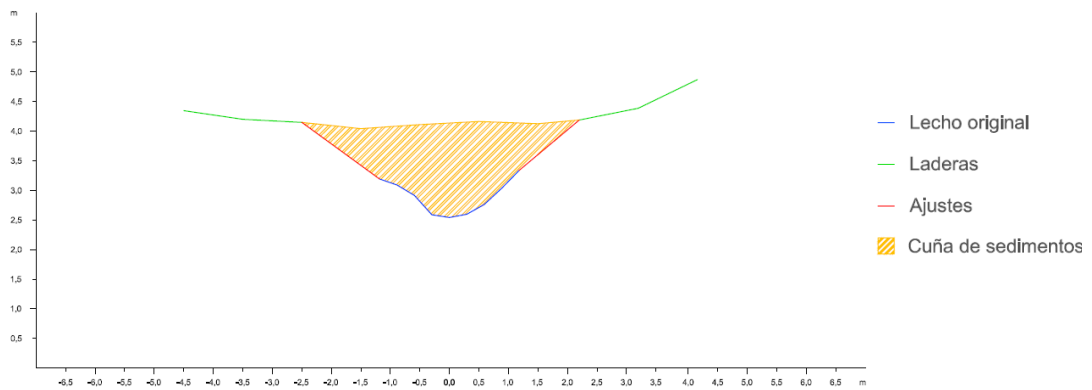


Figura A2.398. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

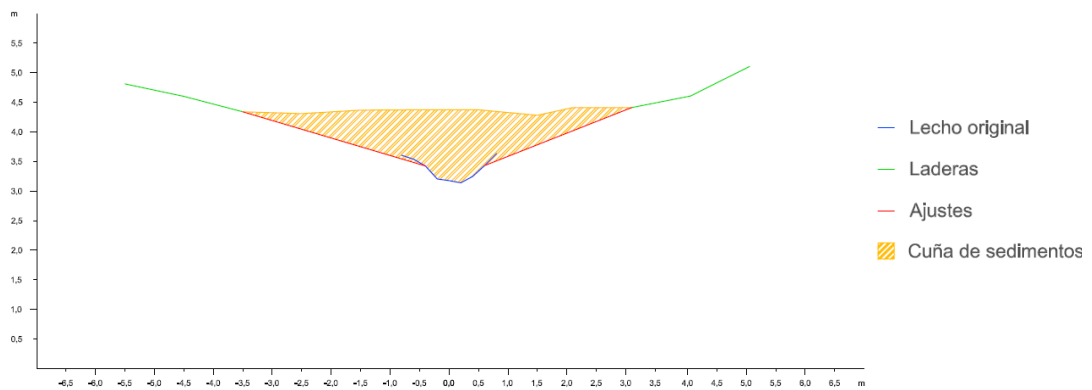


Figura A2.399. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

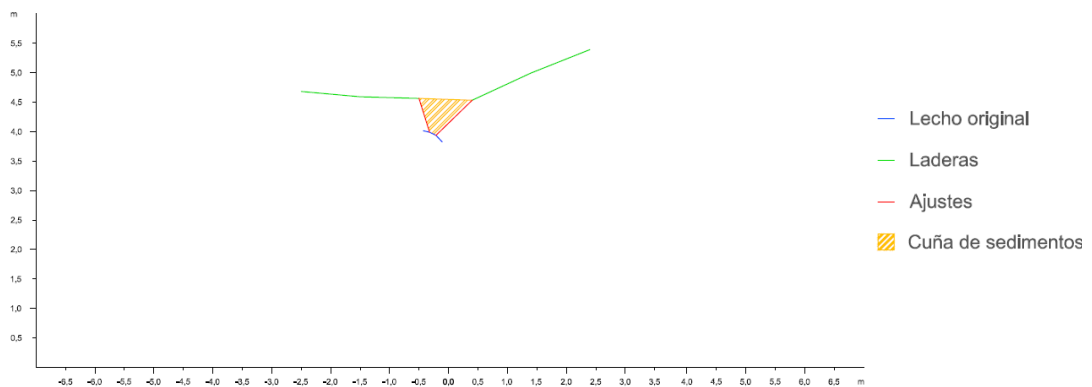


Figura A2.400. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 98

Dique 99

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 99 (Tabla A2.91) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.401 a A2.405).



Tabla A2.91. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 99

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	5,6618	13,7615	1	22,0354	21,0750
2		3,5125		3		
2	3,0	3,5125	8,7542	2	13,6970	13,9416
3		2,3236		4		
3	3,0	2,3236	4,8206	3	5,8840	5,3406
4		0,8901		5		
4	3,0	0,8901	1,3352	4	0,8604	0,0000
5		0,0000		Fin cuña		
5	2,8	0,0000	0,0000	Opción 1	27,9194	26,4156
Fin cuña		0,0000		Opción 2	28,3189	27,7031
Volumen total			28,6713		28,1191	27,0593
Errores			A₁= 0,5522		A₂= -1,0598	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

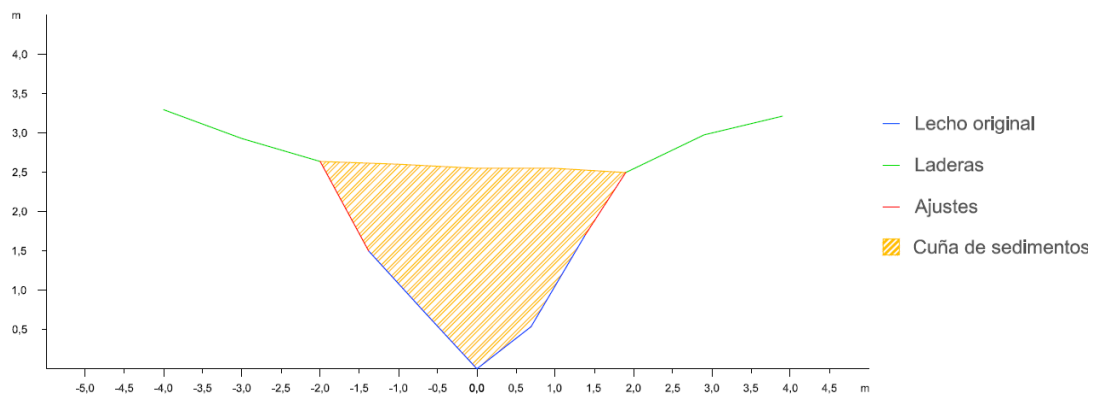


Figura A2.401. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 99

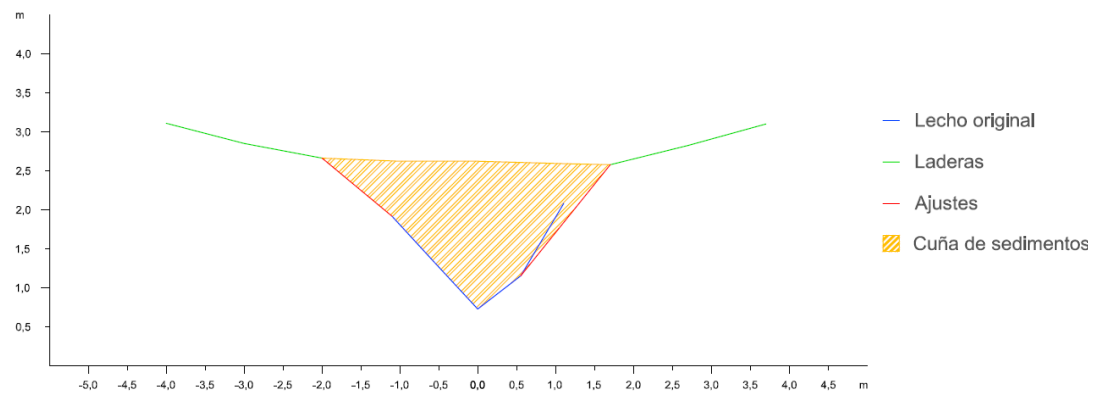


Figura A2.402. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 99

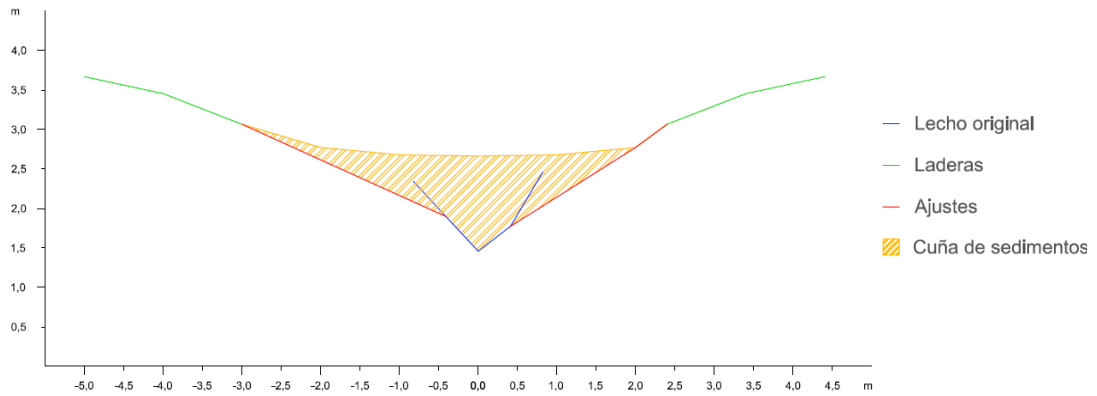


Figura A2.403. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 99

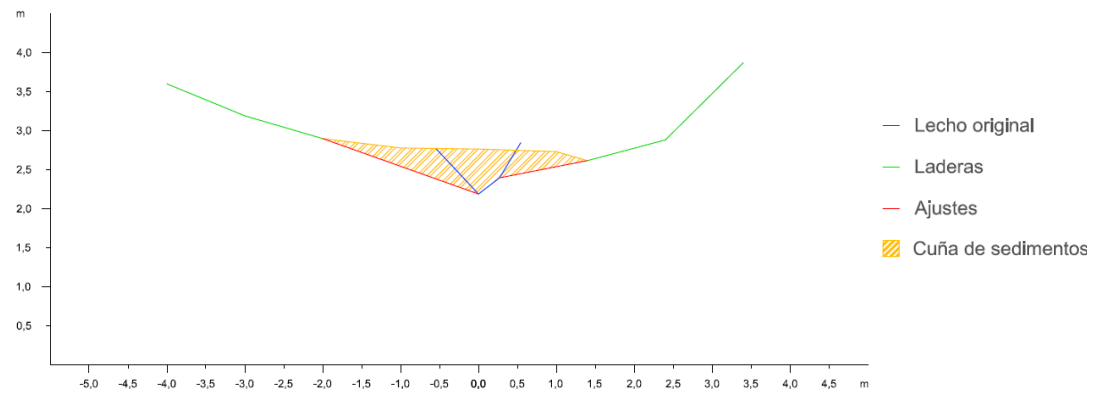


Figura A2.404. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 99

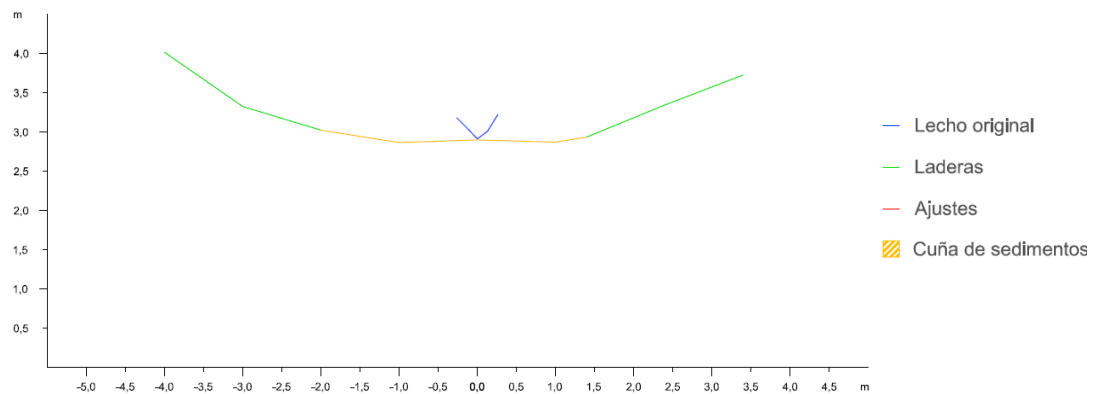


Figura A2.405. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 99

Dique 100

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 100 (Tabla A2.92) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.406 a A2.409).



Tabla A2.92. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 100

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	12,2133	18,5438	1	26,7832	25,3220
2		6,3305		3		
2	2,0	6,3305	8,9700	2	11,5236	10,5580
3		2,6395		4		
3	2,0	2,6395	3,0364	3	1,6979	0,9565
4		0,3969		Fin cuña		
4	0,41	0,3969	0,0814	Opción 1	28,4811	26,2785
Fin cuña		0,0000		Opción 2	30,1488	29,1832
Volumen total			30,6316		29,3149	27,7308
Errores			A₁= 1,3166		A₂= -1,5841	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

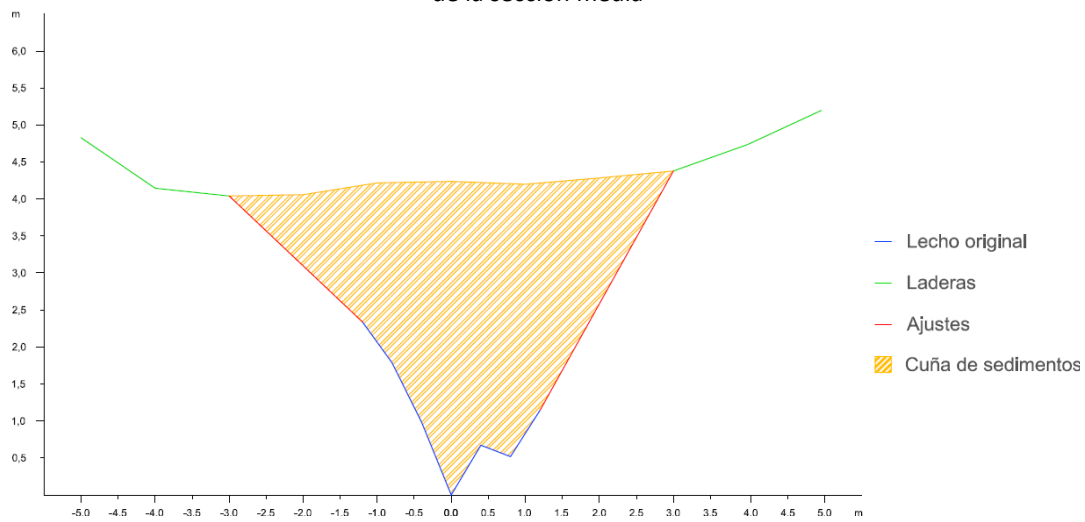


Figura A2.406. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 100

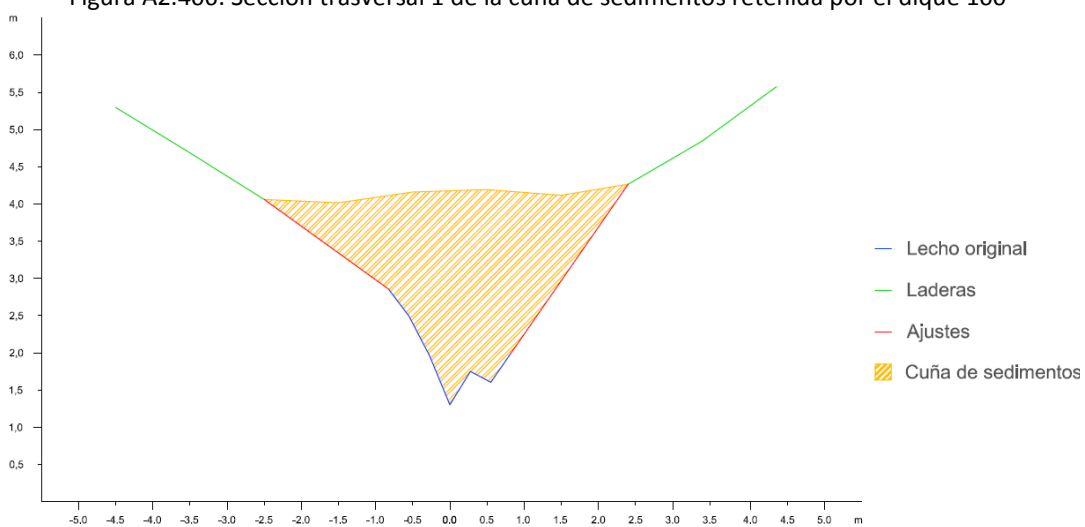


Figura A2.407. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 100

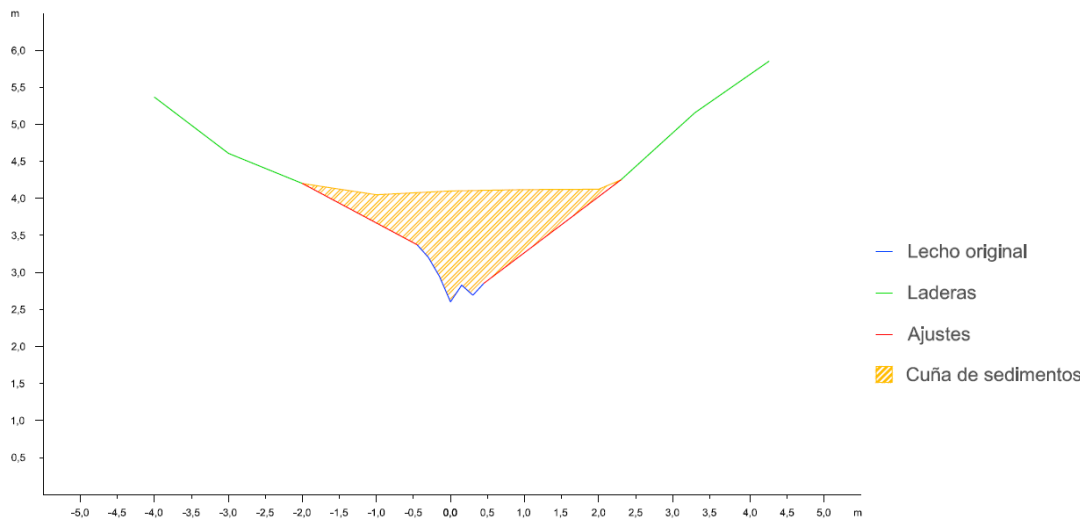


Figura A2.408. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 100

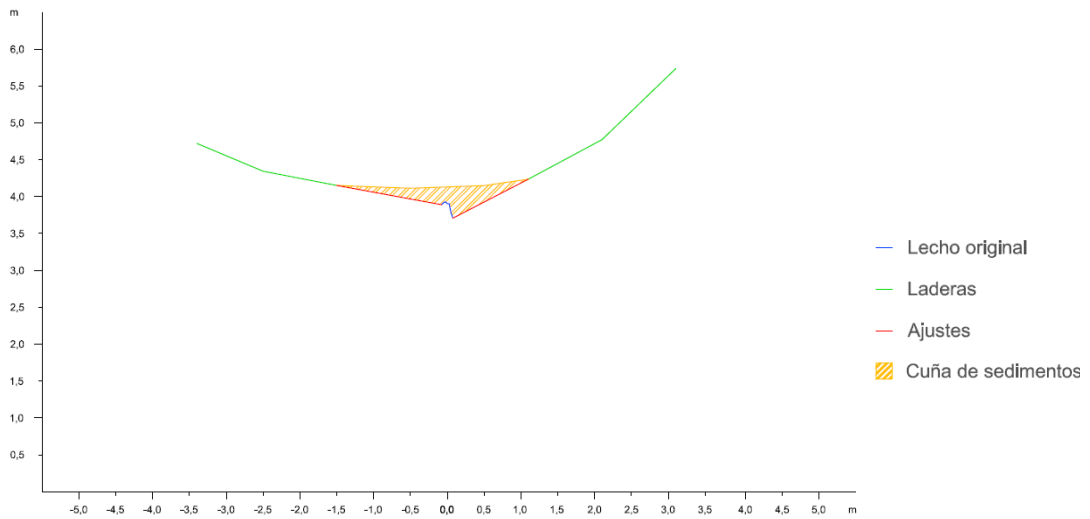


Figura A2.409. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 100

Dique 102

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 102 (Tabla A2.93) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.410 a A2.418).



Tabla A2.93. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		34,4518		1		
2	5	30,6417	162,7338	3	296,7510	306,4170
2		30,6417		2		
3	5	21,0320	129,1843	4	217,3292	210,3200
3		21,0320		3		
4	5	15,6278	91,6495	5	157,5975	156,2780
4		15,6278		4		
5	5	11,0153	66,6078	6	109,6570	110,1530
5		11,0153		5		
6	5	6,1052	42,8013	7	63,8982	61,0520
6		6,1052		6		
7	5	2,9028	22,5200	8	30,8460	29,0280
7		2,9028		7		
8	5	0,7912	9,2350	9	10,5038	7,9120
8		0,7912		8		
9	5	0,2347	2,5648	Fin	2,1048	1,7133
9		0,2347		Opción 1	529,0204	531,9289
Fin cuña	2,3	0,0000	0,2699	Opción 2	522,6708	513,9481
Volumen total			527,5662		525,8456	522,9385
Errores			A₁= 1,7206		A₂= -2,9071	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

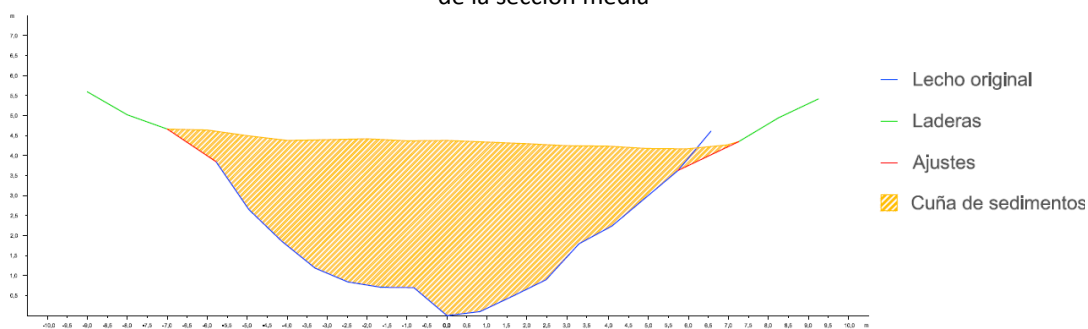


Figura A2.410. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

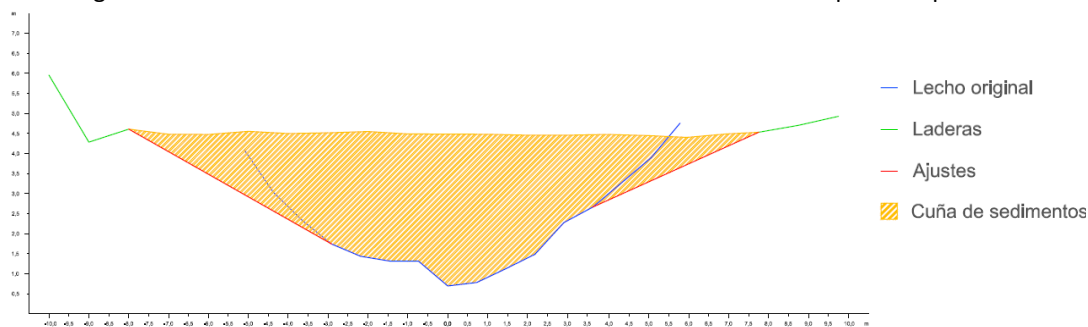


Figura A2.411. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

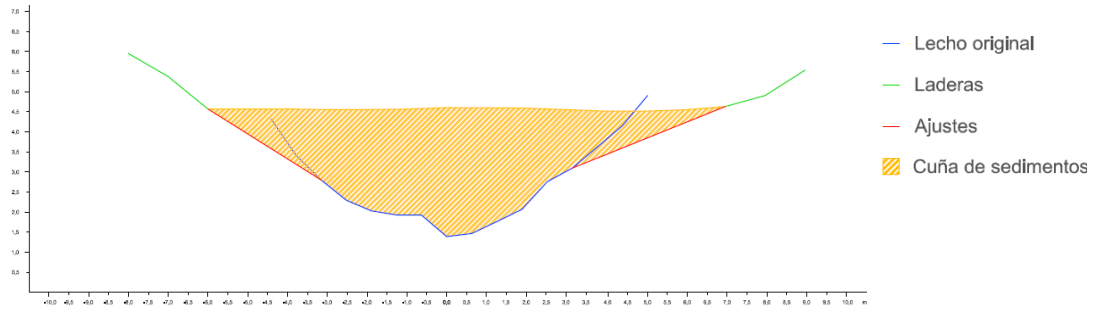


Figura A2.412. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

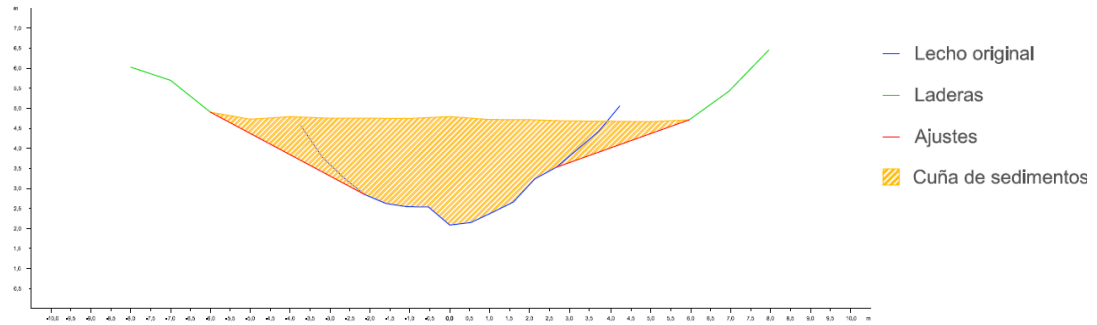


Figura A2.413. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

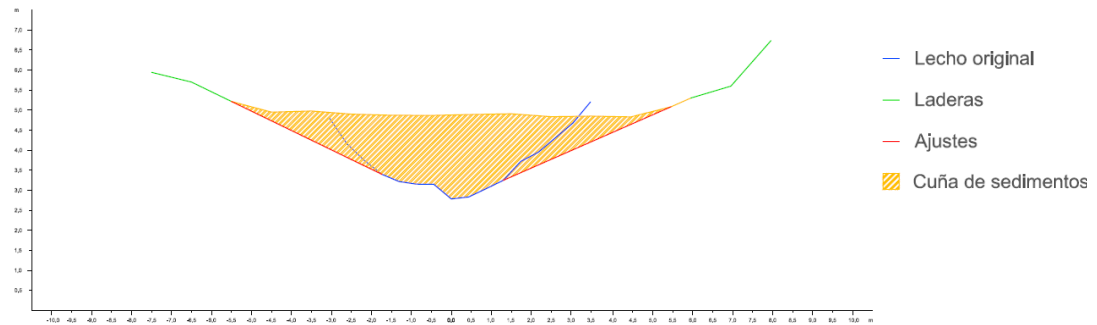


Figura A2.414. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

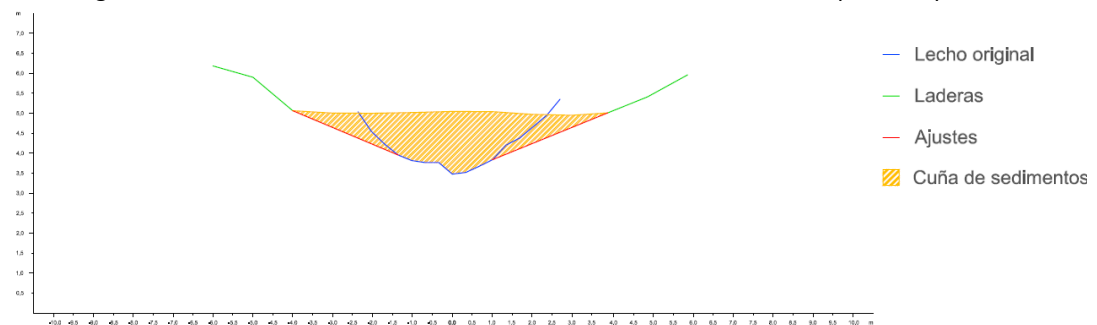


Figura A2.415. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

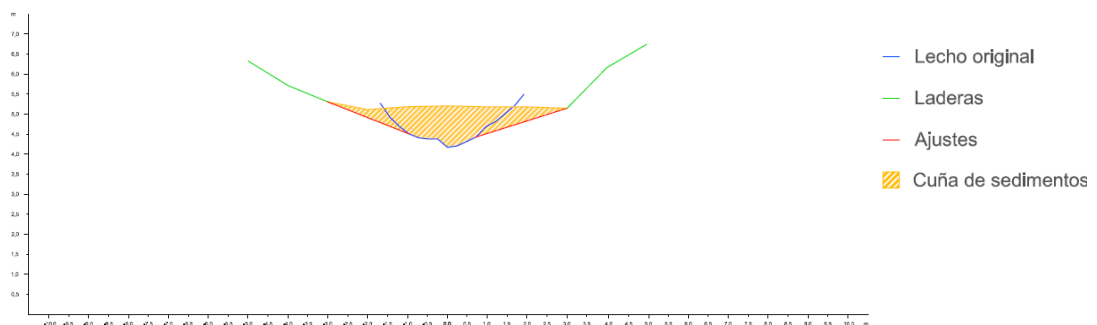


Figura A2.416. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

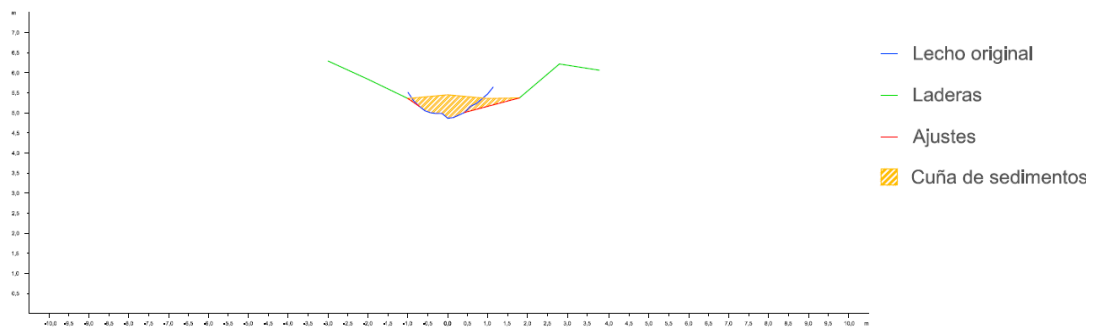


Figura A2.417. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

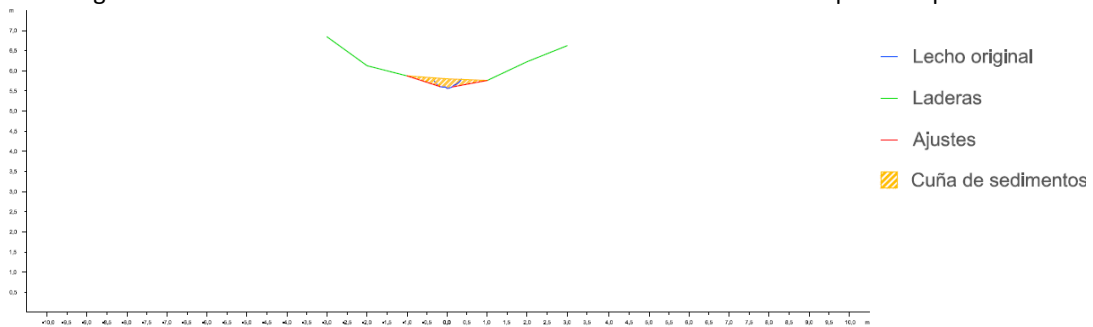


Figura A2.418. Sección transversal 9 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 102

Dique 103

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 103 (Tabla A2.94) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.419 a A2.432).



Tabla A2.94. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	5	81,1478	384,0038	1	712,8653	724,5370
2		72,4537		3		
2	5	72,4537	323,0258	2	573,6553	567,5660
3		56,7566		4		
3	5	56,7566	253,6743	3	448,9415	447,1310
4		44,7131		5		
4	5	44,7131	196,1725	4	348,9078	337,5590
5		33,7559		6		
5	5	33,7559	158,4098	5	290,6550	296,0800
6		29,6080		7		
6	5	29,6080	129,5328	6	223,9512	222,0510
7		22,2051		8		
7	5	22,2051	95,3685	7	160,6130	159,4230
8		15,9423		9		
8	5	15,9423	65,8395	5	108,6412	103,9350
9		10,3935		7		
9	5	10,3935	45,1548	6	75,0827	76,6840
10		7,6684		8		
10	5	7,6684	29,1273	10	42,7128	39,8250
11		3,9825		12		
11	5	3,9825	15,0295	11	21,4812	20,2930
12		2,0293		13		
12	5	2,0293	7,0458	12	8,9355	7,8900
13		0,7890		14		
13	5	0,7890	2,4125	13	2,2395	1,5840
14		0,1760		Fin cuña		
14	4	0,1760	0,3520	Opción 1	1711,8782	1725,7320
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			1705,1485		1701,51888	1694,45688
Errores			A ₁ = 3,6296		A ₂ = -7,0620	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

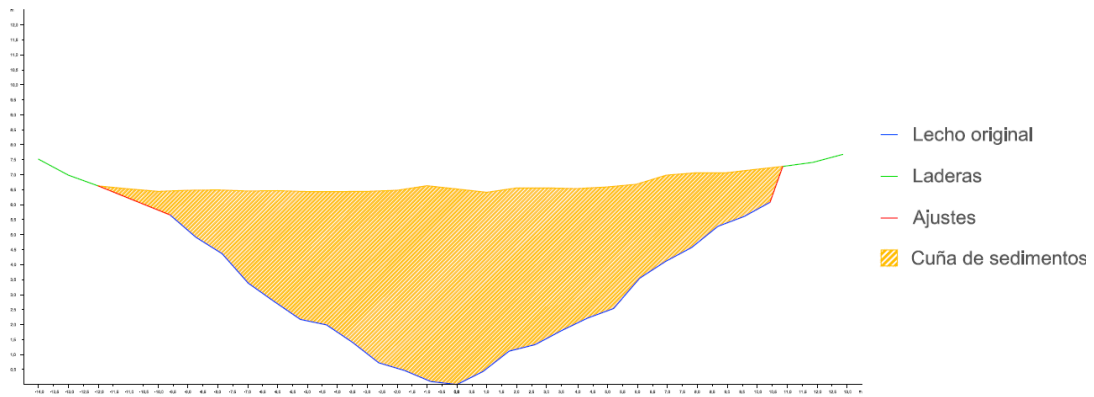


Figura A2.419. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

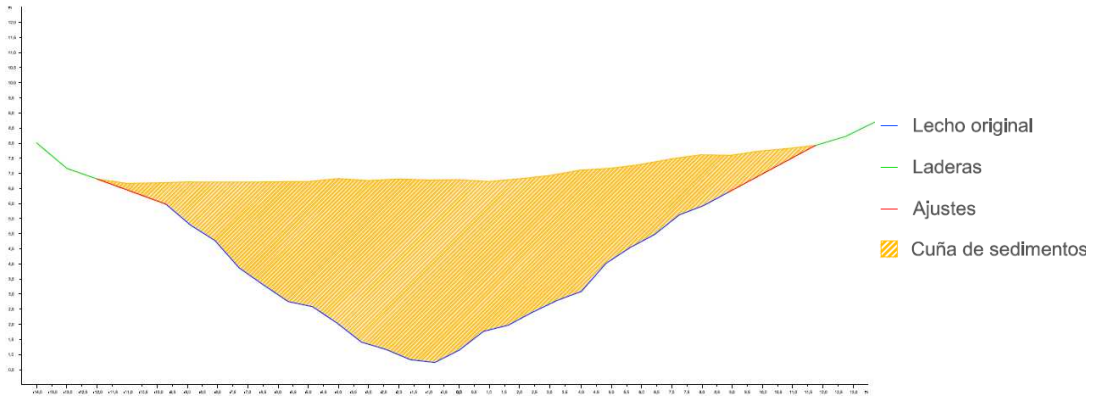


Figura A2.420. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

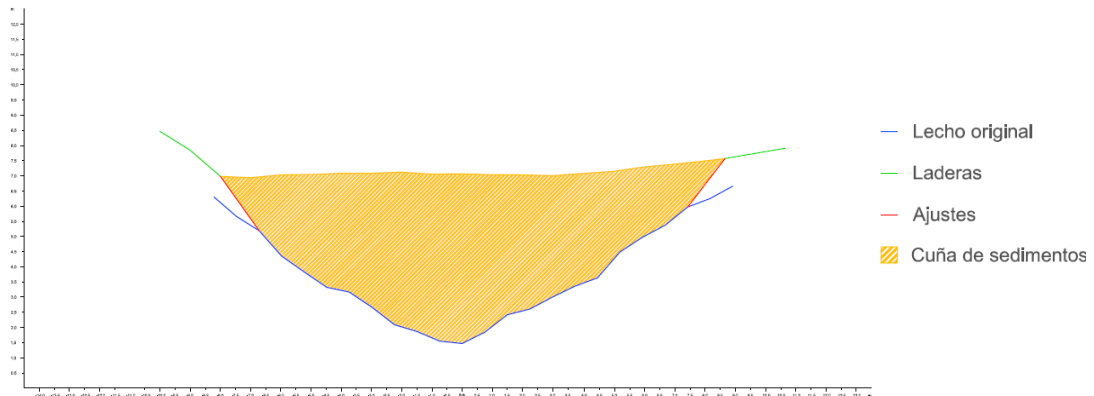


Figura A2.421. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

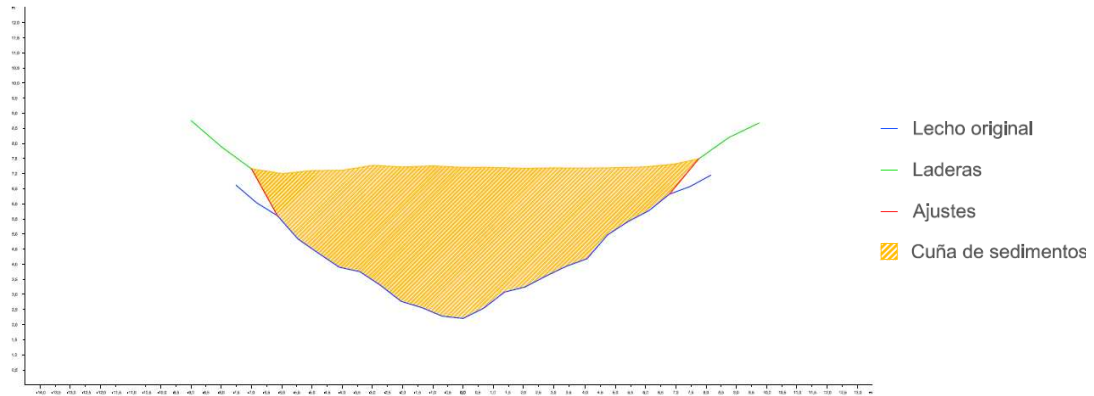


Figura A2.422. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

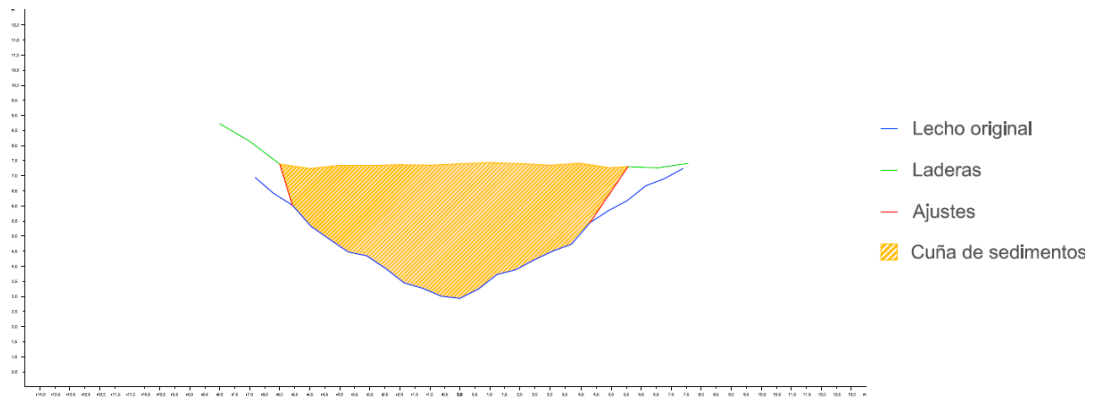


Figura A2.423. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

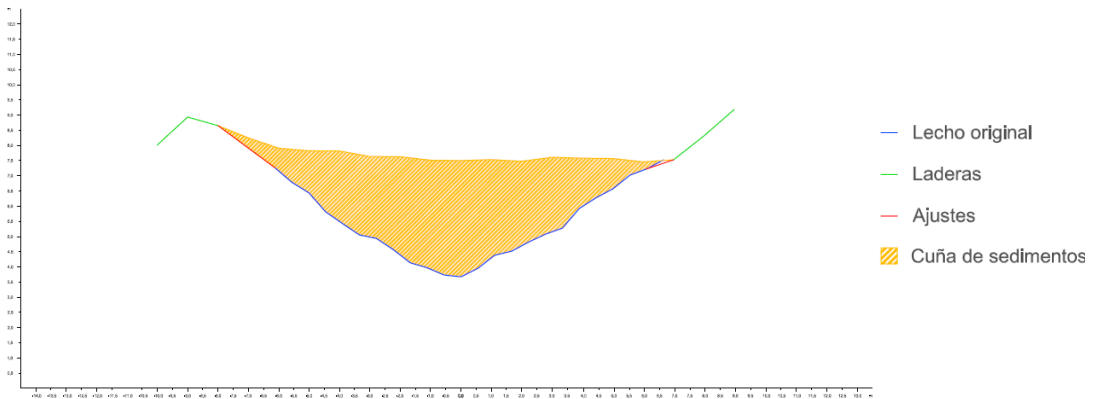


Figura A2.424. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

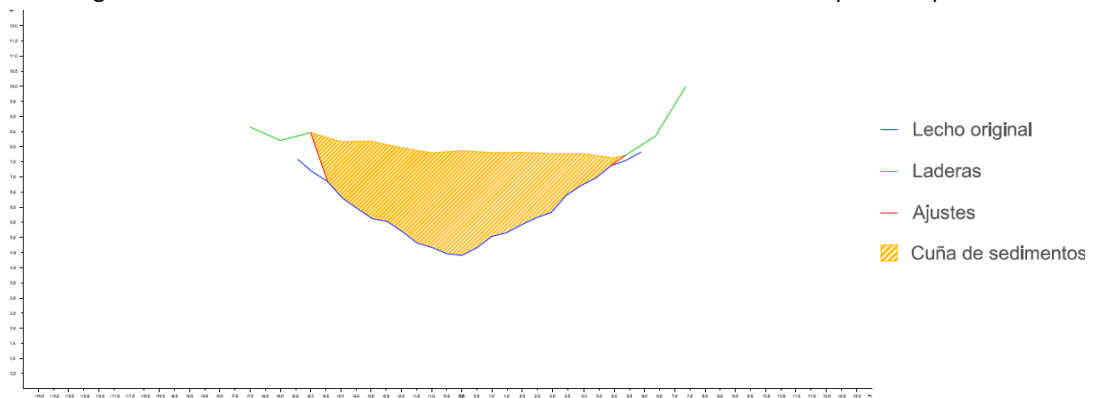


Figura A2.425. Sección transversal 7 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

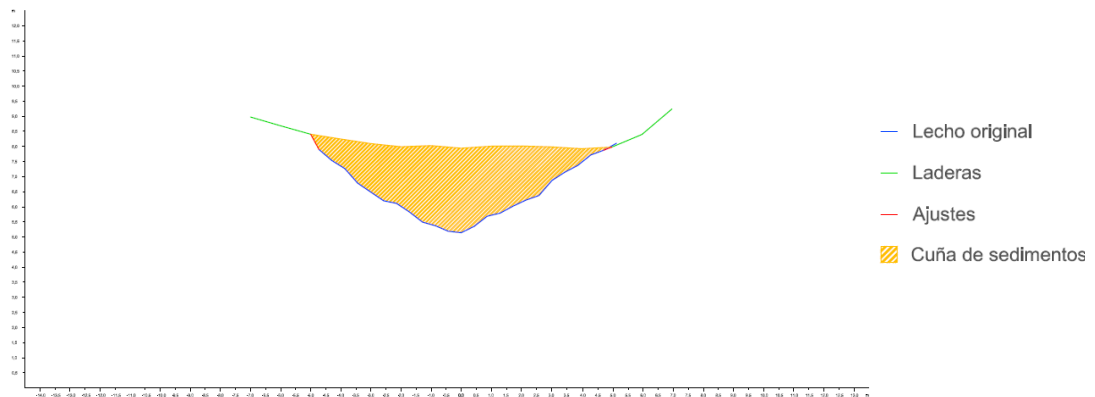


Figura A2.426. Sección transversal 8 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

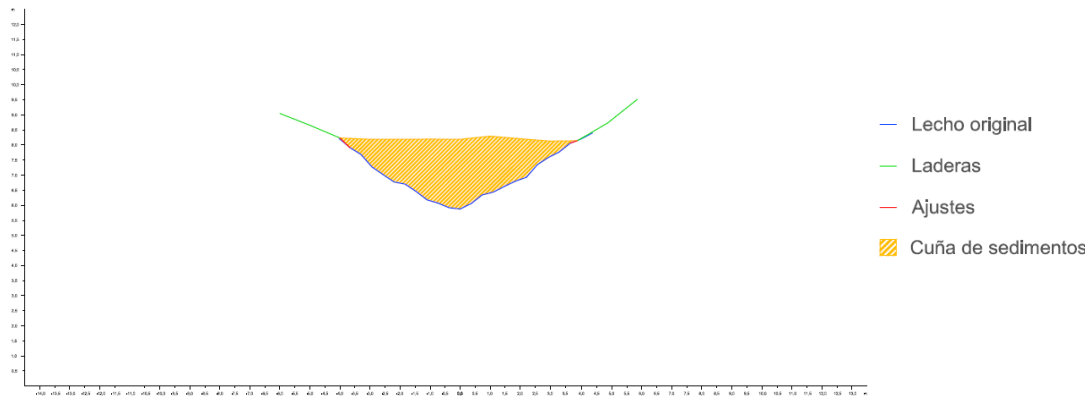


Figura A2.427. Sección transversal 9 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

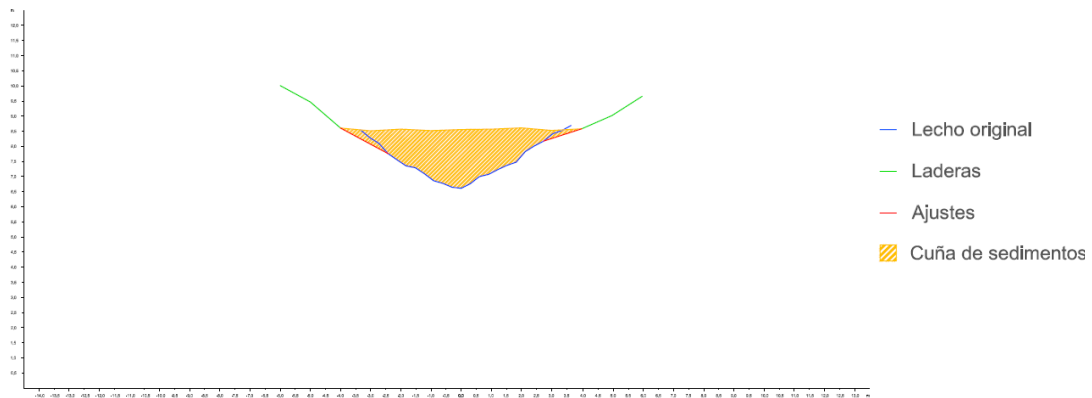


Figura A2.428. Sección transversal 10 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

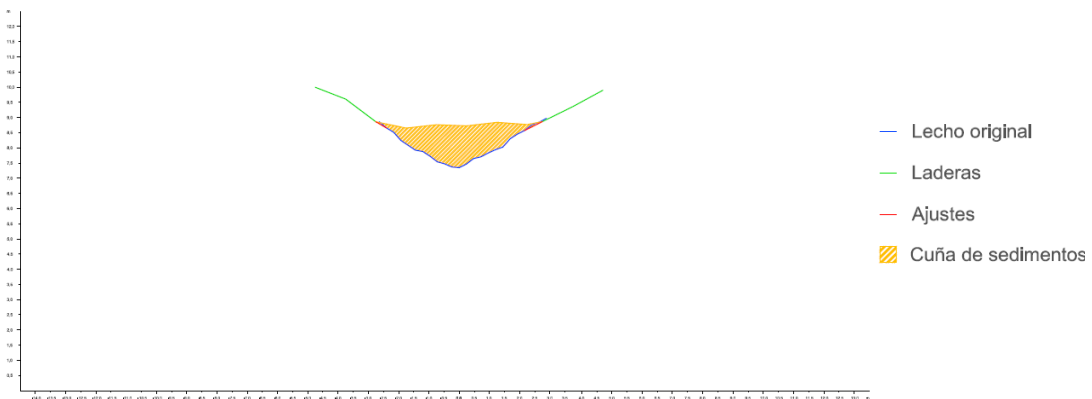


Figura A2.429. Sección transversal 11 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

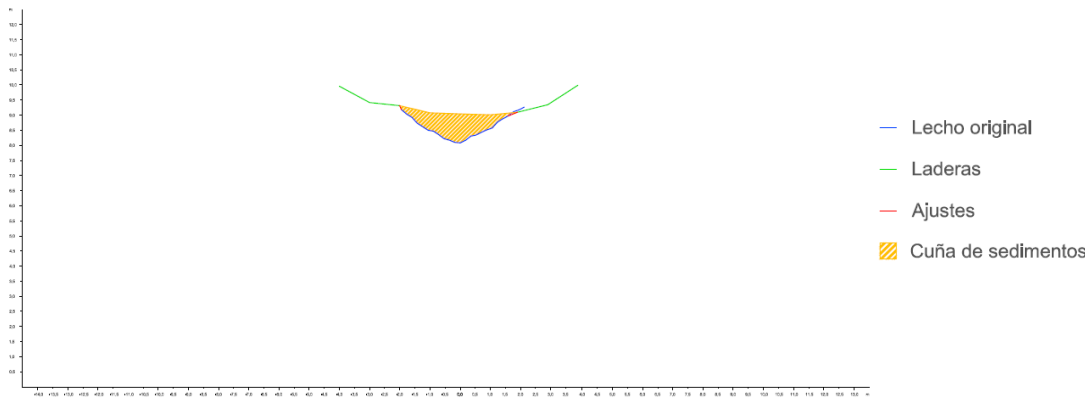


Figura A2.430. Sección transversal 12 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

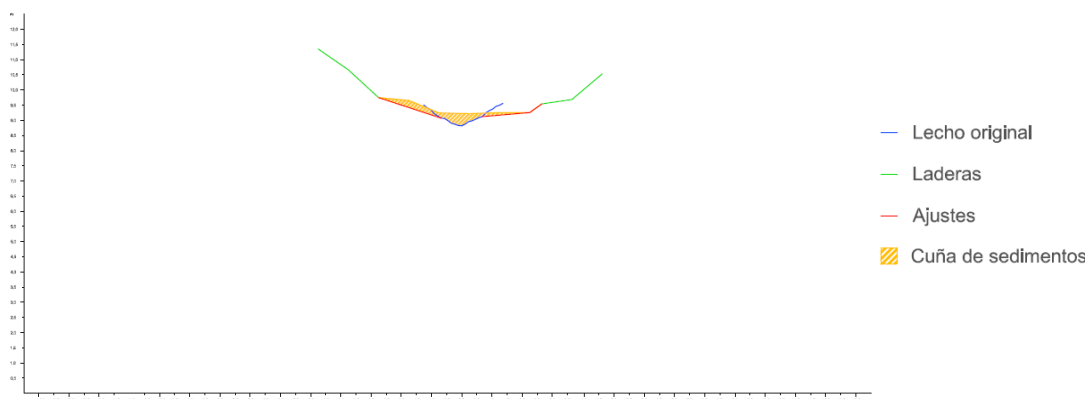


Figura A2.431. Sección transversal 13 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

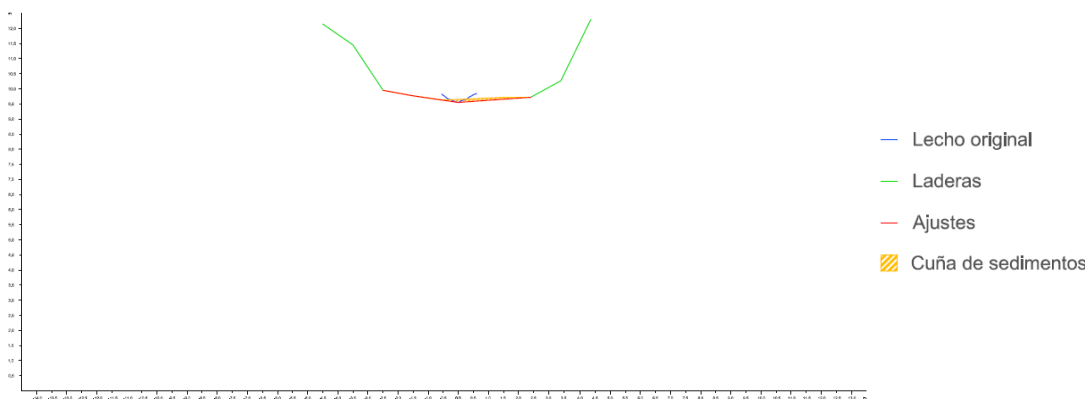


Figura A2.432. Sección transversal 14 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 103

Dique 104

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 104 (Tabla A2.95) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.433 a A2.436).

Tabla A2.95. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 104

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1		20,1364		1		
2	3,0	12,8643	49,5011	3	77,8611	77,1858
2	3,0	12,8643		2		
3		6,2675	28,6977	4	38,7238	37,6050
3	3,0	6,2675		3		
4		0,7895	10,5855	Fin cuña	9,4255	4,7370
4	3,0	0,7895		Opción 1	87,2866	81,9228
Fin cuña	3,00	0,0000	1,1843	Opción 2	89,4091	88,2903
Volumen total			89,9685		88,3479	85,1066
Errores			A ₁ = 1,6207		A ₂ = -3,2413	



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

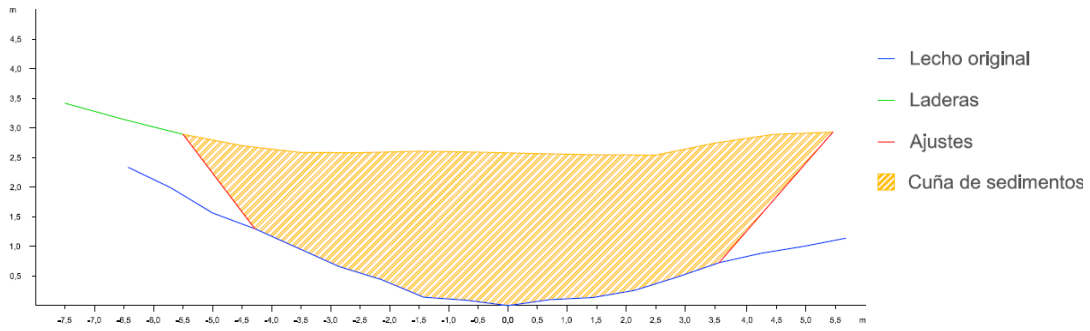


Figura A2.433. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 104

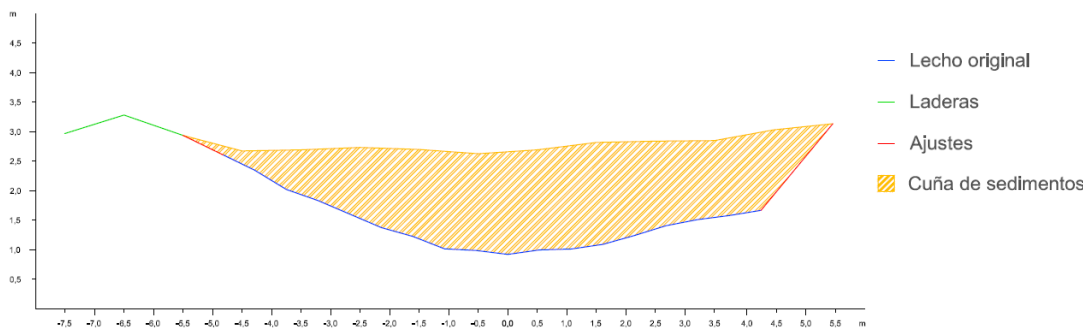


Figura A2.434. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 104

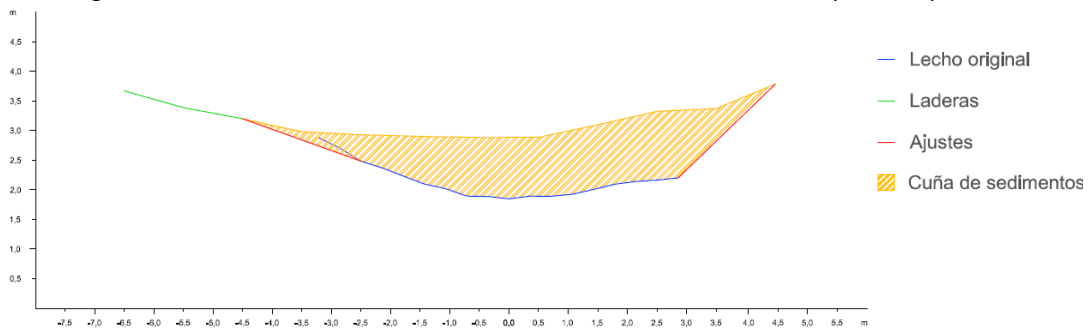


Figura A2.435. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 104

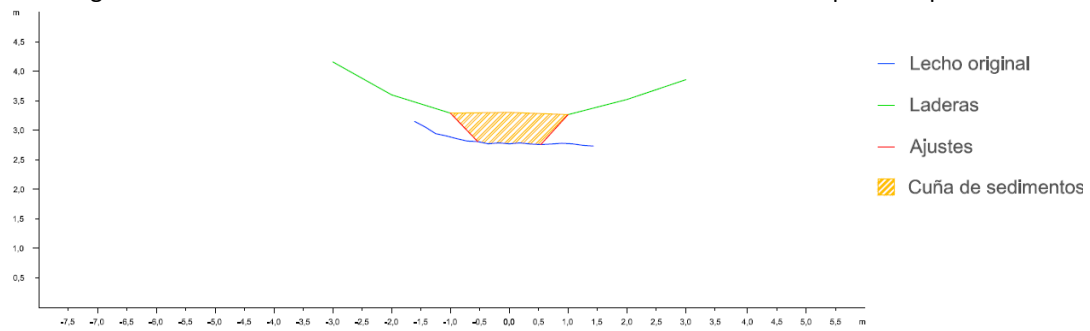


Figura A2.436. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 104

Dique 105

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 105 (Tabla A2.96) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.437 a A2.442).

Tabla A2.96. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	10,3437	22,7340	1	32,8920	28,8738
2		4,8123		3		
2	3,0	4,8123	12,1671	2	19,4443	19,7946
3		3,2991		4		
3	3,0	3,2991	7,1021	3	10,1052	8,6136
4		1,4356		5		
4	3,0	1,4356	3,7490	4	7,2029	6,3822
5		1,0637		6		
5	3,0	1,0637	3,8643	5	5,8095	7,4113
6		1,5125		Fin cuña		
6	1,9	1,5125	1,4369	Opción 1	48,8067	44,8987
Fin		0,0000		Opción 2	50,8181	50,3477
Volumen total			51,0533		49,8124	47,6232
Errores			A₁= 1,2409		A₂= -2,1892	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

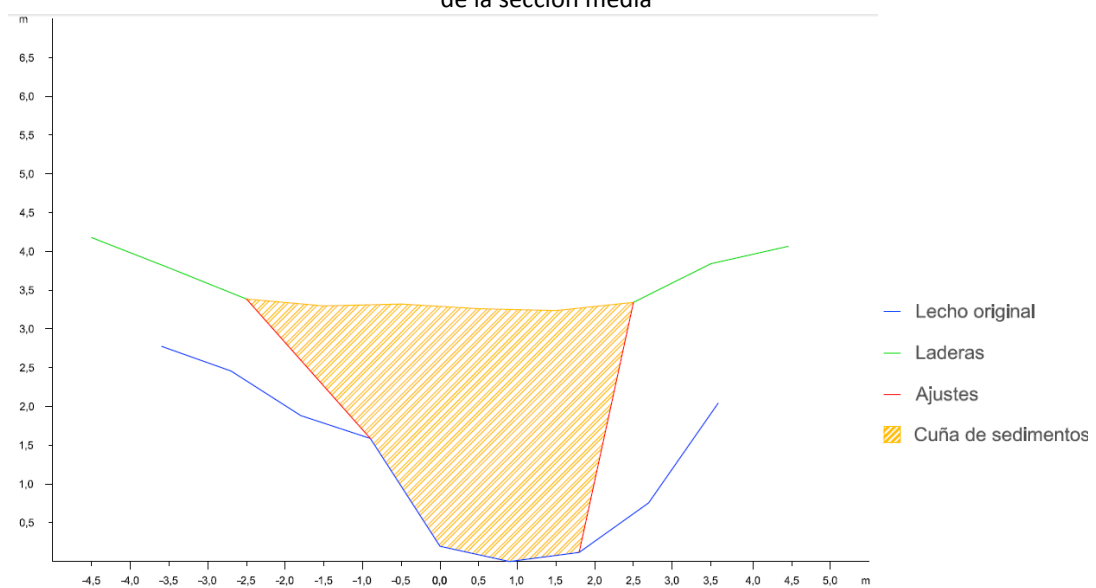


Figura A2.437. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

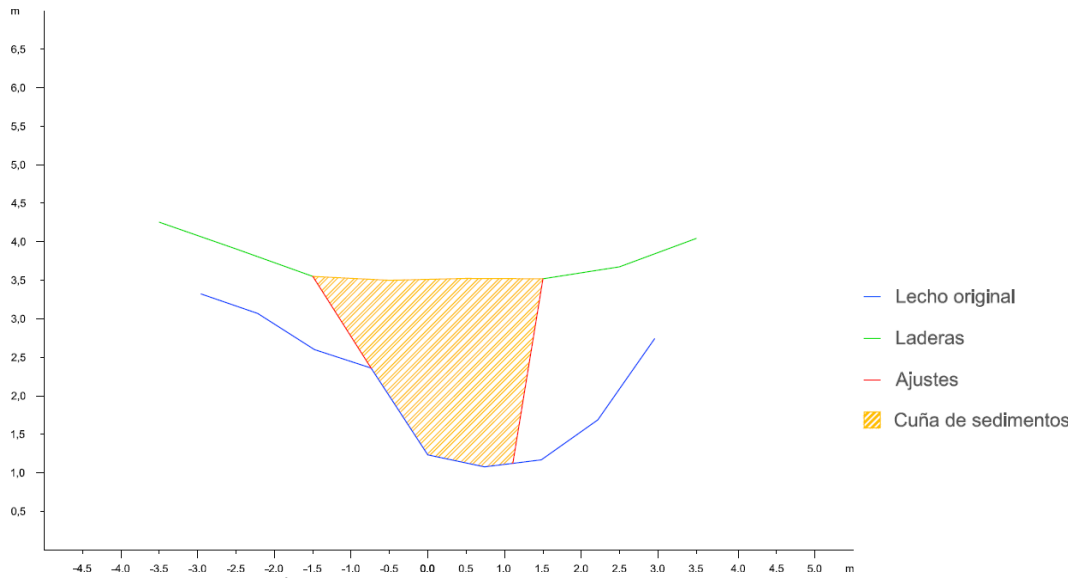


Figura A2.438. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

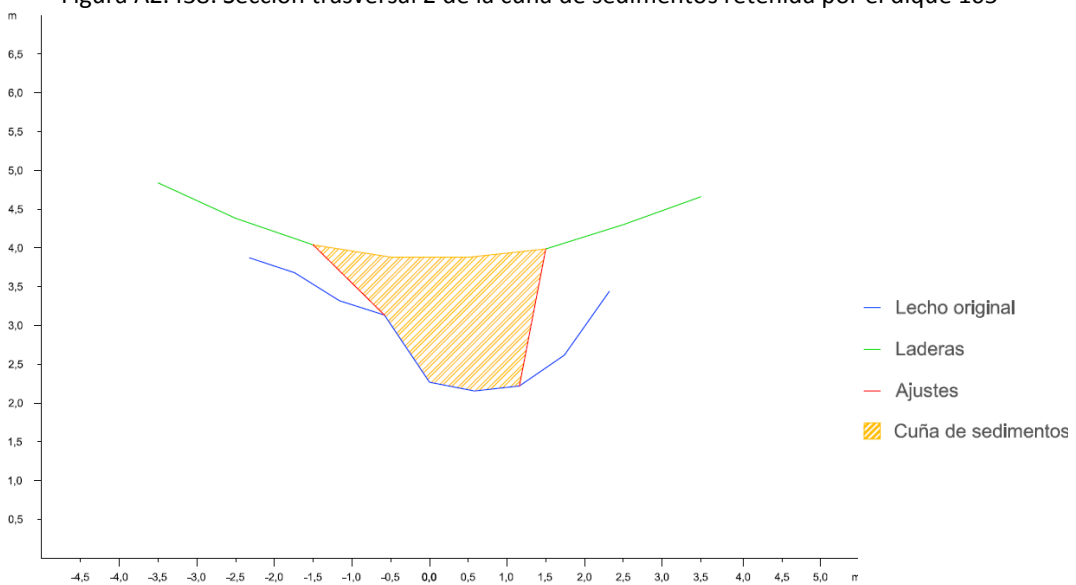


Figura A2.439. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

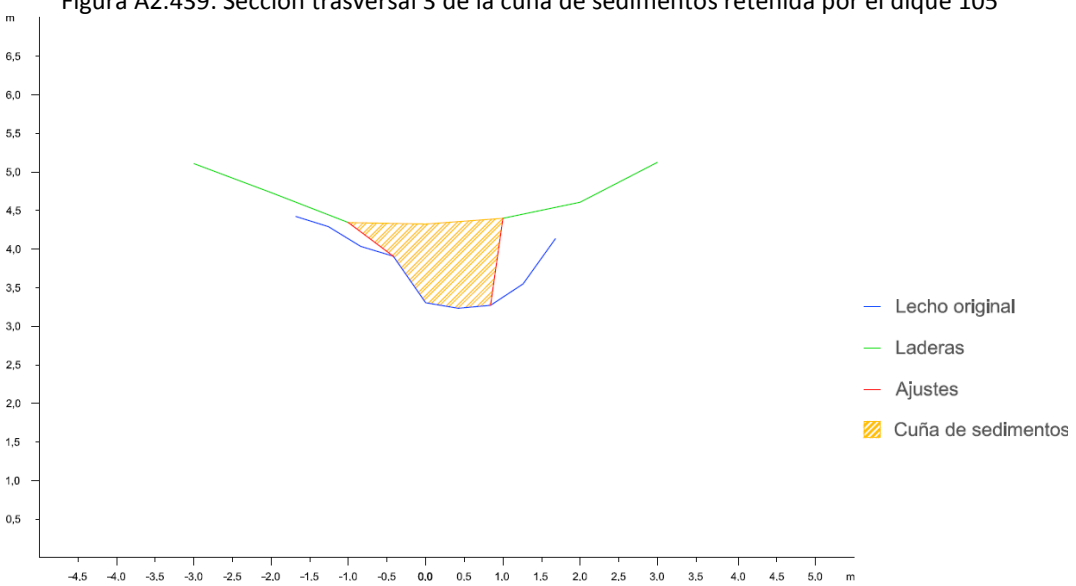


Figura A2.440. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

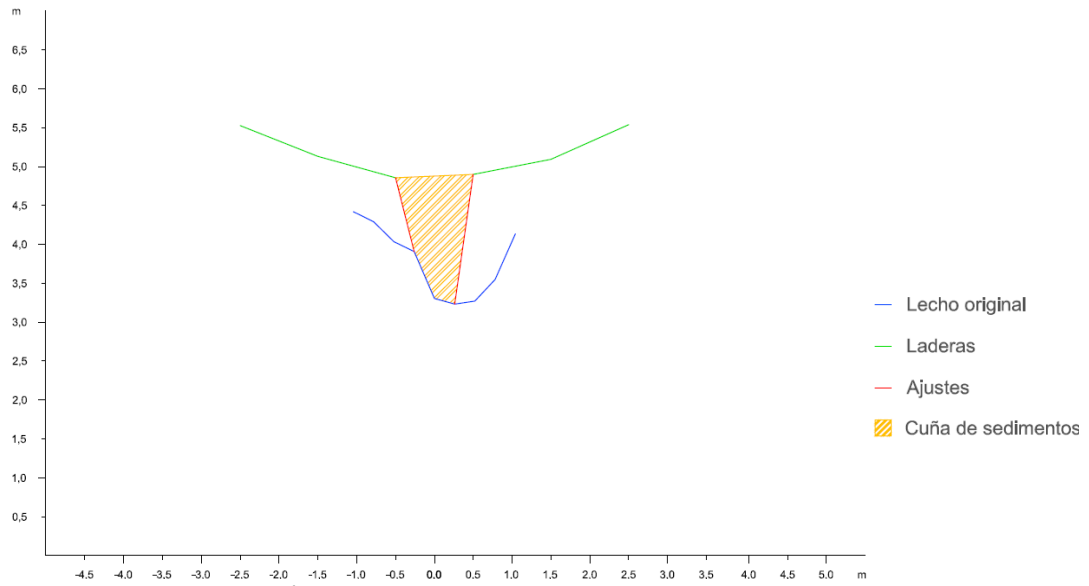


Figura A2.441. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

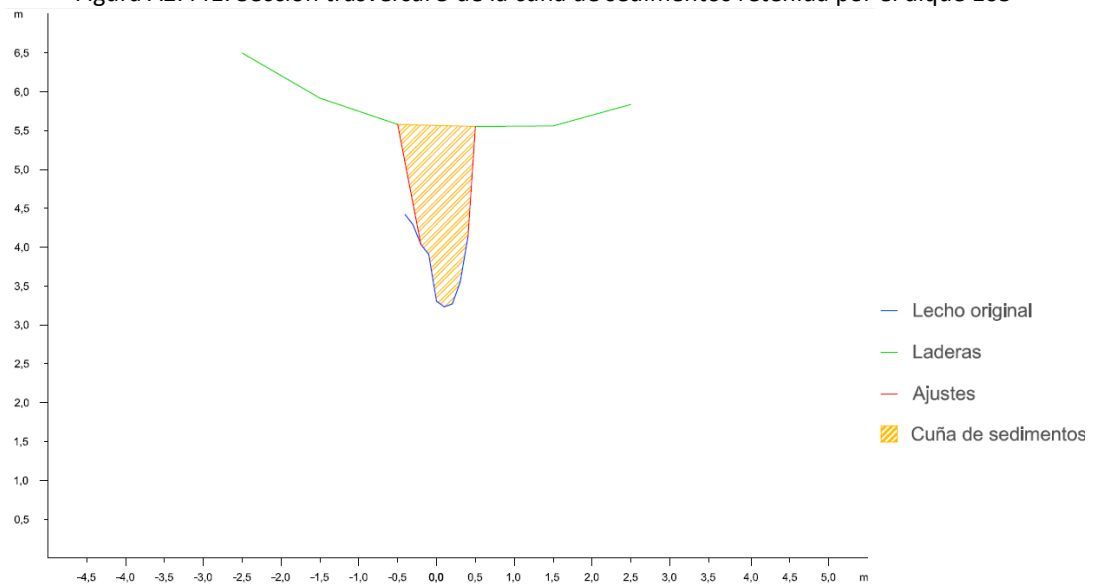


Figura A2.442. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 105

Dique 106

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 106 (Tabla A2.97) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.443 a A2.446).



Tabla A2.97. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 106

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	8,8310	19,0398	1	25,8469	23,1732
2		3,8622		3		
2	3,0	3,8622	8,1440	2	10,4637	9,4026
3		1,5671		4		
3	3,0	1,5671	2,8503	3	2,4163	1,6655
4		0,3331		Fin cuña		
4	2,00	0,3331	0,3331	Opción 1	28,2632	24,8387
Fin cuña		0,0000		Opción 2	29,8366	28,7755
Volumen total			30,3672		29,0499	26,8071
Errores			A ₁ = 1,3173		A ₂ = -2,2428	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

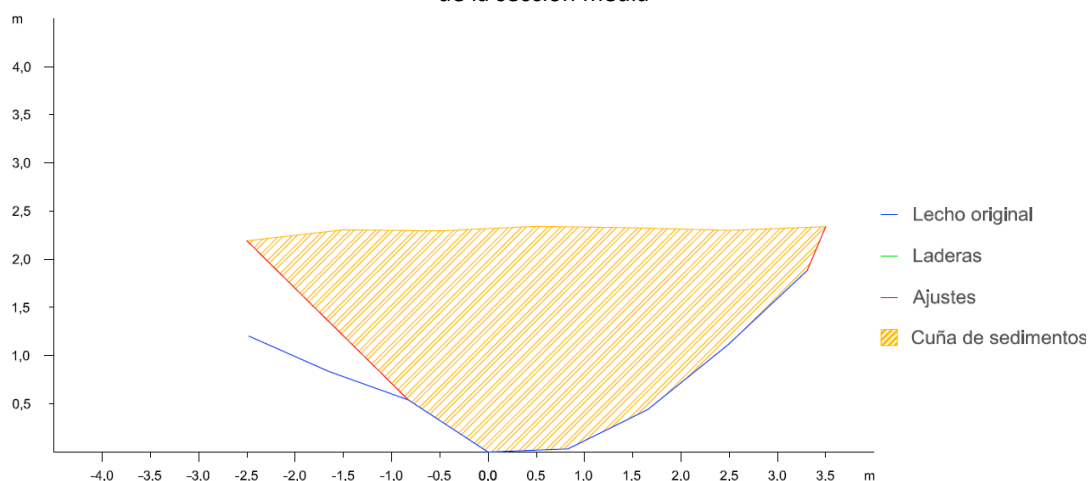


Figura A2.443. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 106

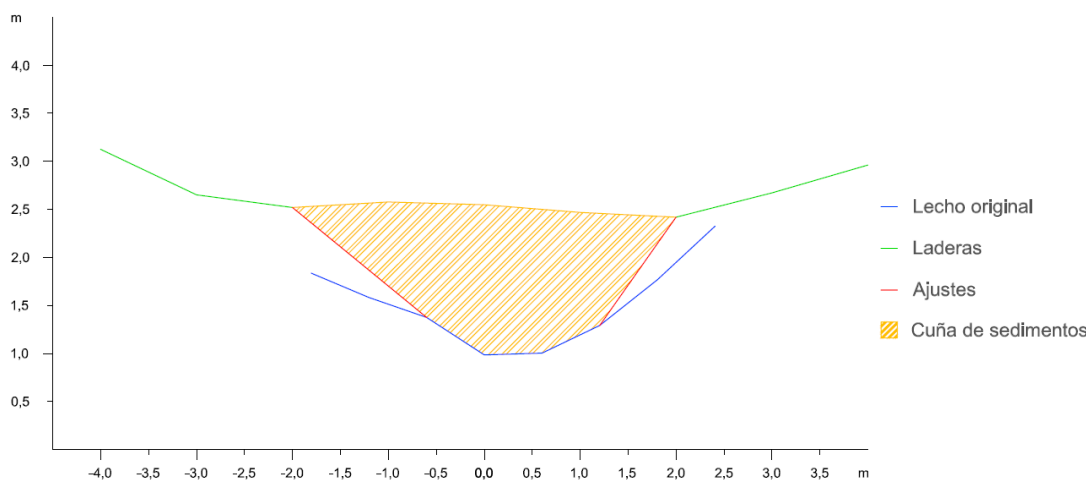


Figura A2.444. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 106

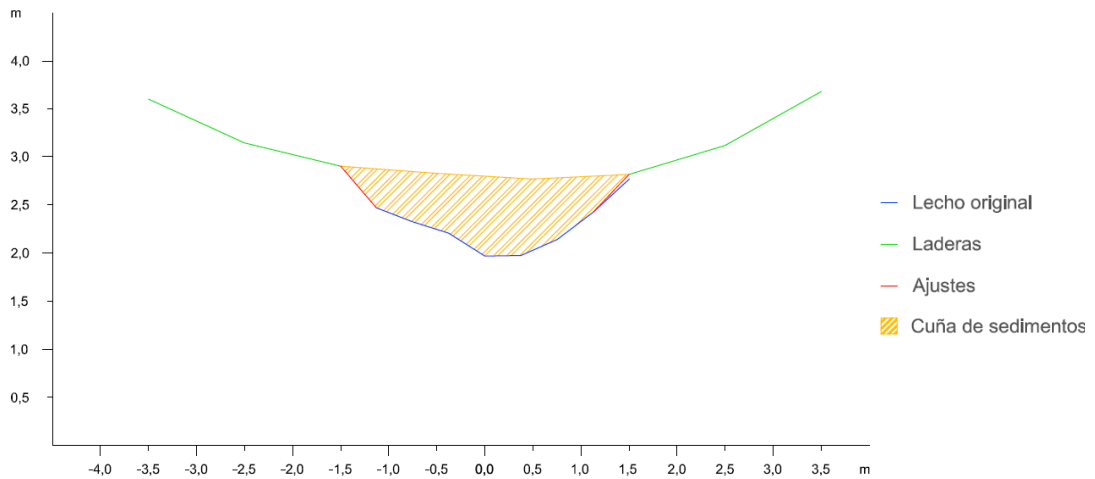


Figura A2.445. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 106

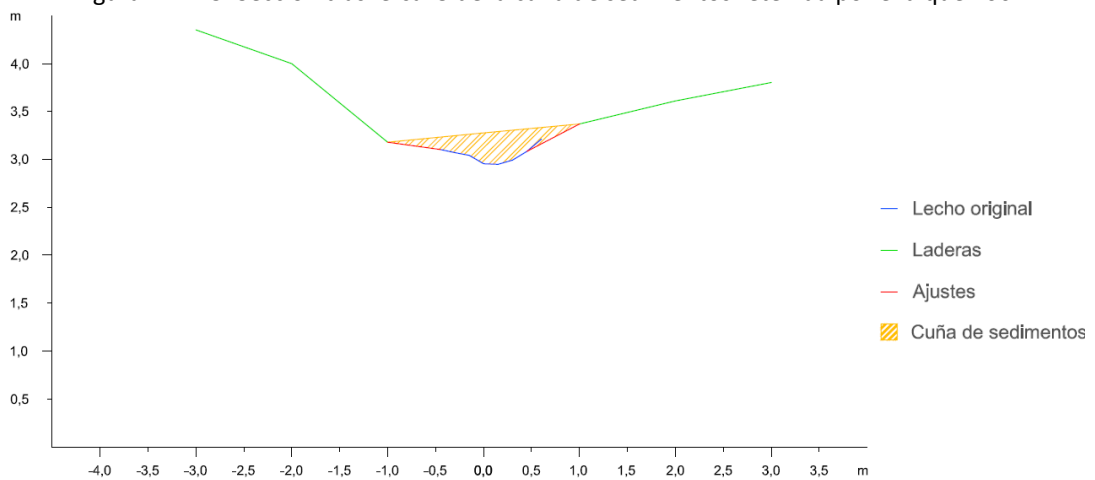


Figura A2.446. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 106

Dique 107

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 107 (Tabla A2.98) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.447 a A2.450).



Tabla A2.98. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 107

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	26,2537	60,4583	1	84,0109	84,3108
2		14,0518		3		
2	3,0	14,0518	23,4027	2	22,8031	9,3000
3		1,5500		4		
3	3,0	1,5500	6,1520	3	11,5593	15,0527
4		2,5513		Fin cuña		
4	2,90	2,5513	3,6994	Opción 1	95,5702	99,3635
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			93,7123		91,2655	86,4106
Errores			A₁= 2,4468		A₂= -4,8549	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

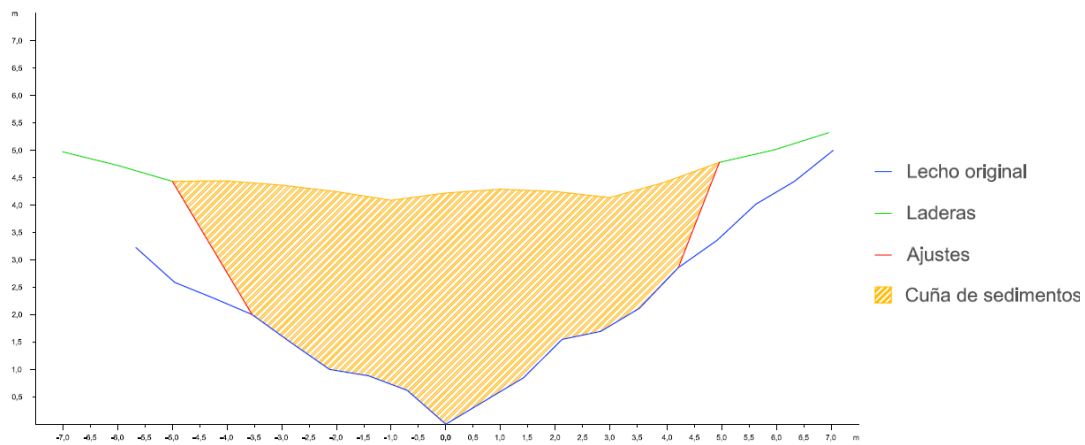


Figura A2.447. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 107

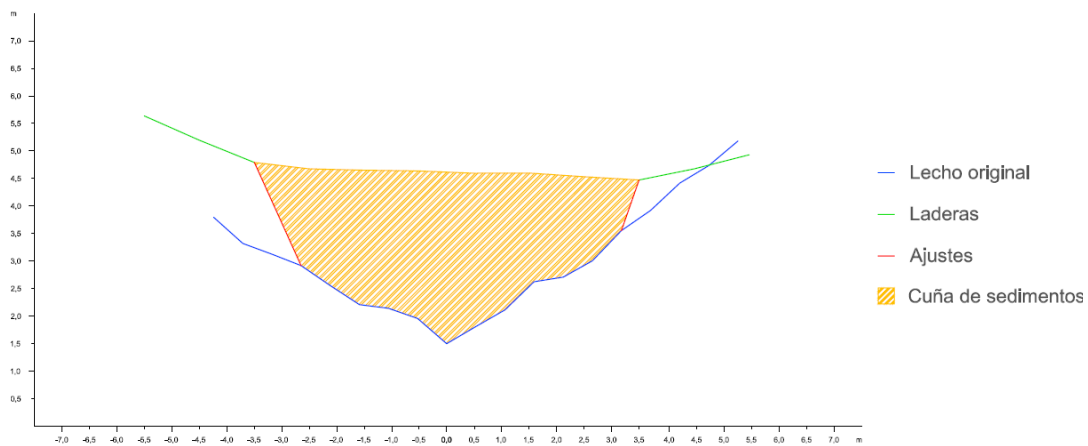


Figura A2.448. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 107

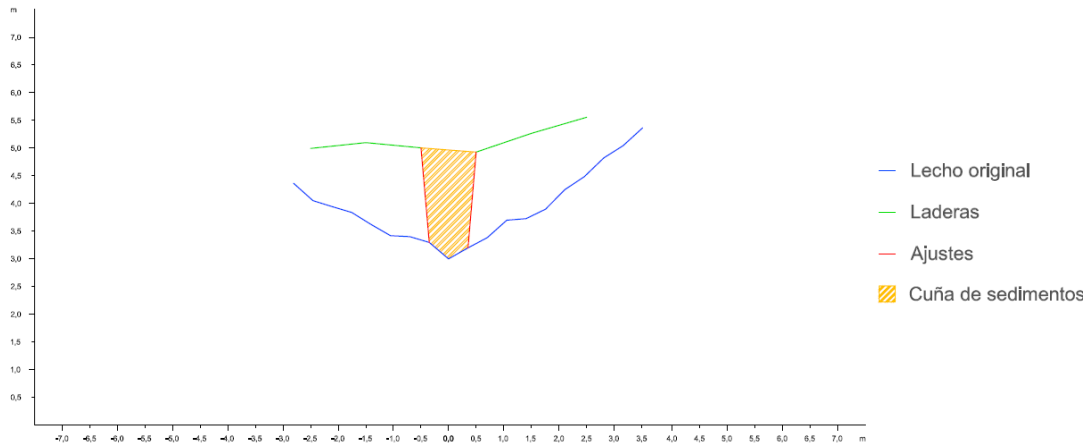


Figura A2.449. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 107

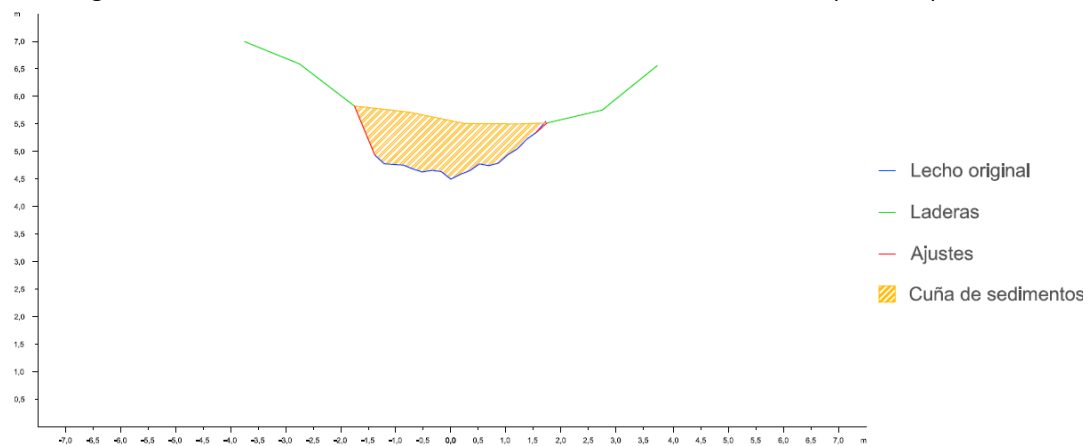


Figura A2.450. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 107

Dique 108

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 108 (Tabla A2.99) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.451 a A2.453).

Tabla A2.99. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 108

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	4,8122	8,8249	1	15,0969	16,0508
2		4,0127		3		
2	2,0	4,0127	5,7951	2	7,4282	7,1296
3		1,7824		Fin cuña		
3	2,00	1,7824	1,7824	Opción 1	16,8793	17,8332
Fin cuña		0,0000		Opción 2	16,2531	15,9545
Volumen total			16,4024		16,5662	16,8939
Errores			A ₁ = -0,1638		A ₂ = 0,3276	



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

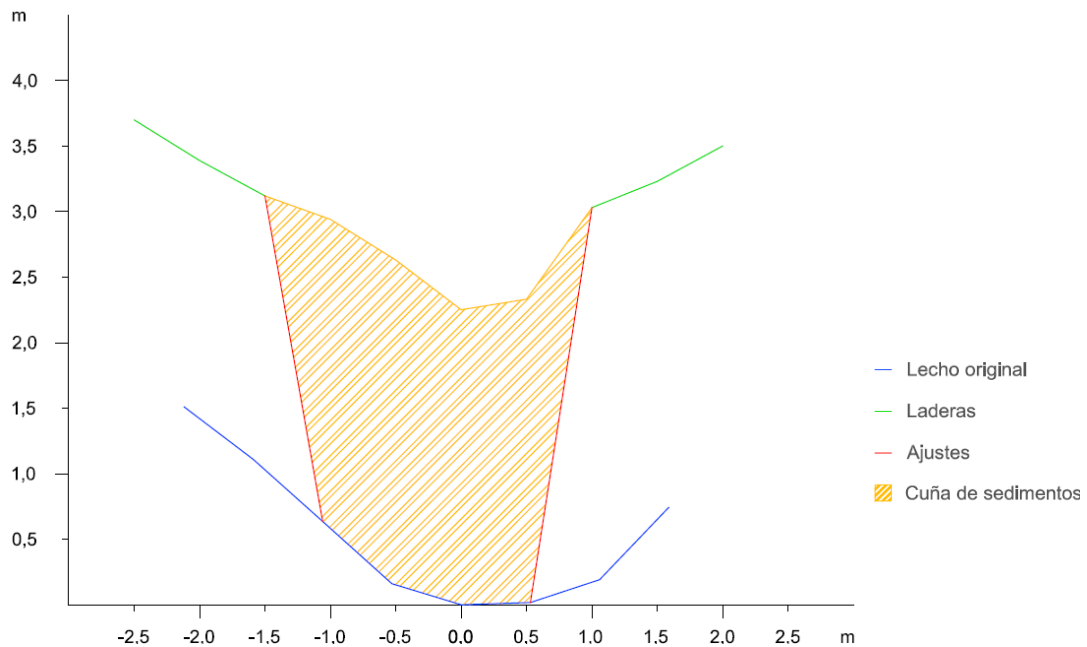


Figura A2.451. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 108

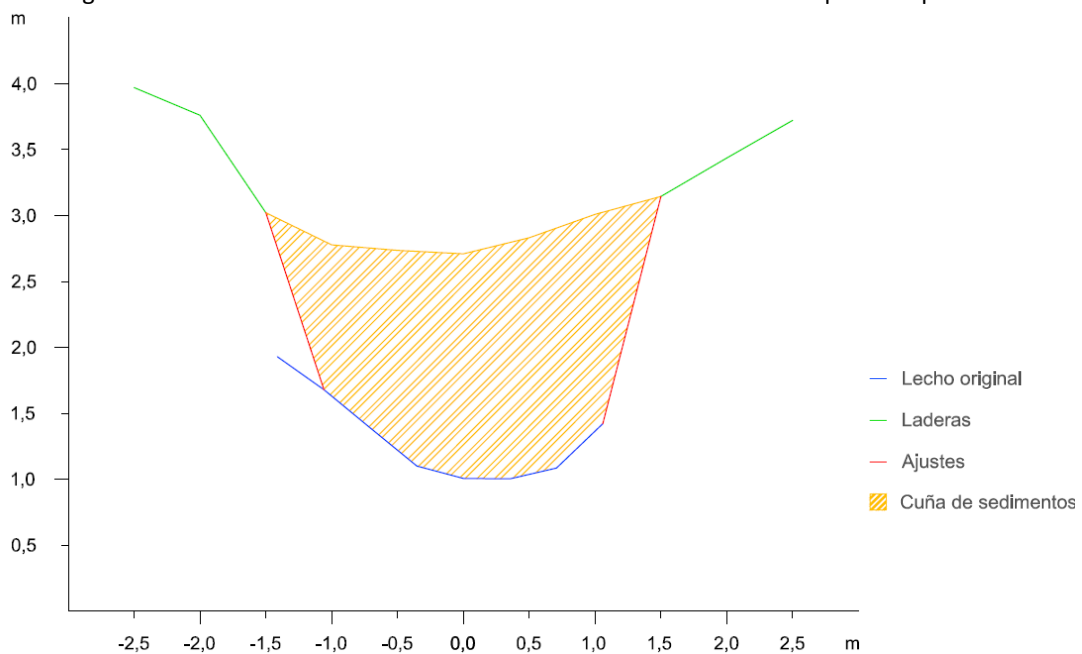


Figura A2.452. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 108

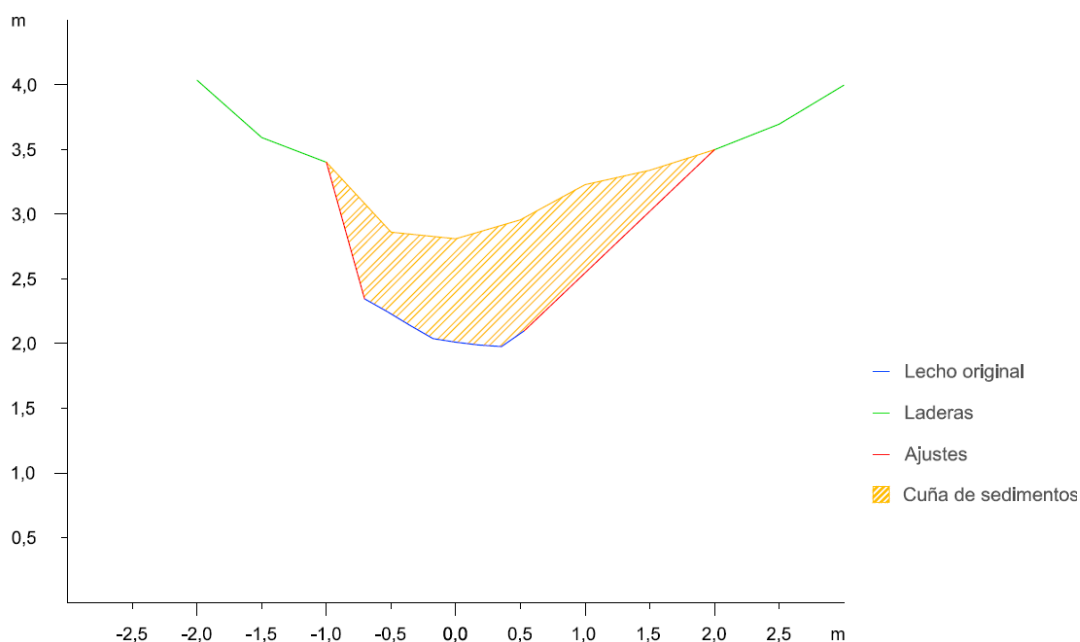


Figura A2.453. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 108

Dique 109

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 109 (Tabla A2.100) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.454 a A2.457).

Tabla A2.100. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 109

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	2,8136	6,9504	1	10,4055	10,9200
2		1,8200		3		
2	3,0	1,8200	3,1979	2	3,2988	1,8714
3		0,3119		4		
3	3,0	0,3119	0,8147	3	1,2367	1,3872
4		0,2312		Fin cuña		
4	3,00	0,2312	0,3468	Opción 1	11,6422	12,3072
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			11,3097		11,1191	10,7379
Errores			A ₁ = 0,1906		A ₂ = -0,3812	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

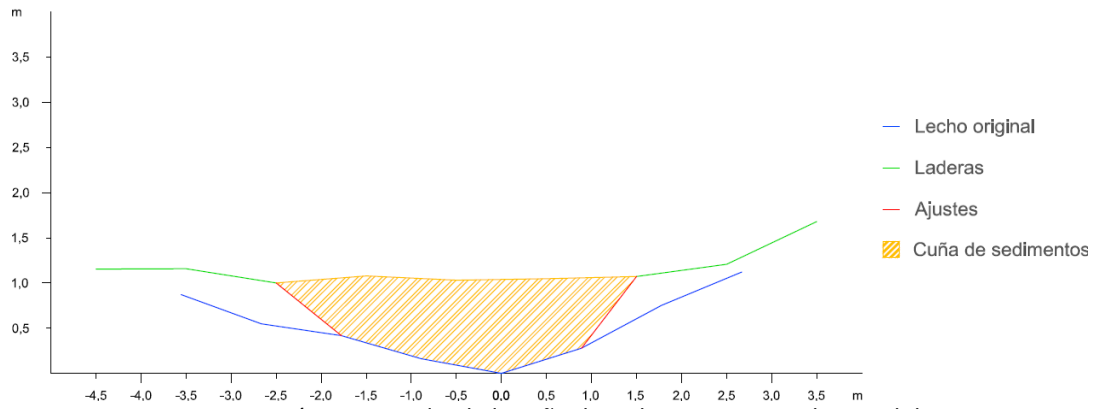


Figura A2.454. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 109

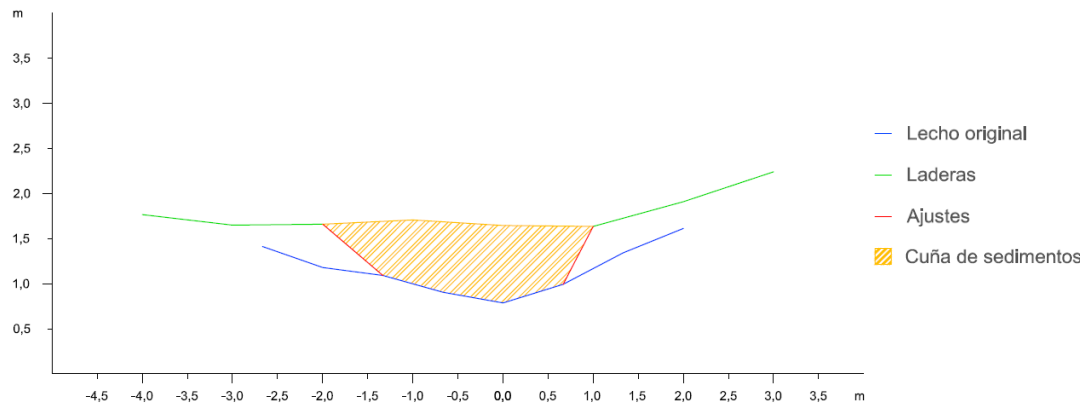


Figura A2.455. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 109

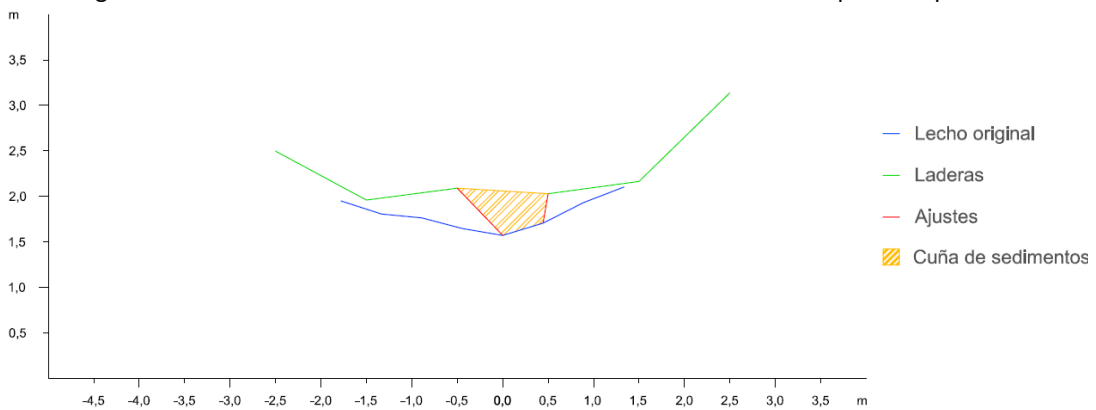


Figura A2.456. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 109

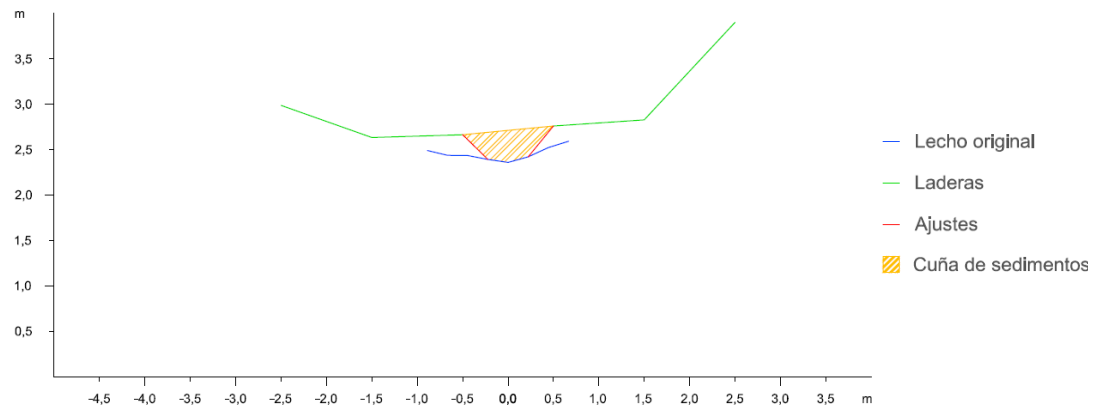


Figura A2.457. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 109

Dique 110

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 110 (Tabla A2.101) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.458 a A2.462).

Tabla A2.101. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 110

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	19,9308	46,1889	1	67,2349	65,1708
2		10,8618		3		
2	3,0	10,8618	22,0781	2	29,5920	23,1414
3		3,8569		4		
3	3,0	3,8569	10,7393	3	19,3327	19,8156
4		3,3026		5		
4	3,0	3,3026	8,3520	4	7,8307	8,6085
5		2,2654		Fin cuña		
5	0,8	2,2654	0,9062	Opción 1	87,4738	85,8926
Fin cuña		0,0000		Opción 2	83,6116	77,9388
Volumen total			88,2644		85,5427	81,9157
Errores			A ₁ = 2,7217	A ₂ = -3,6270		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

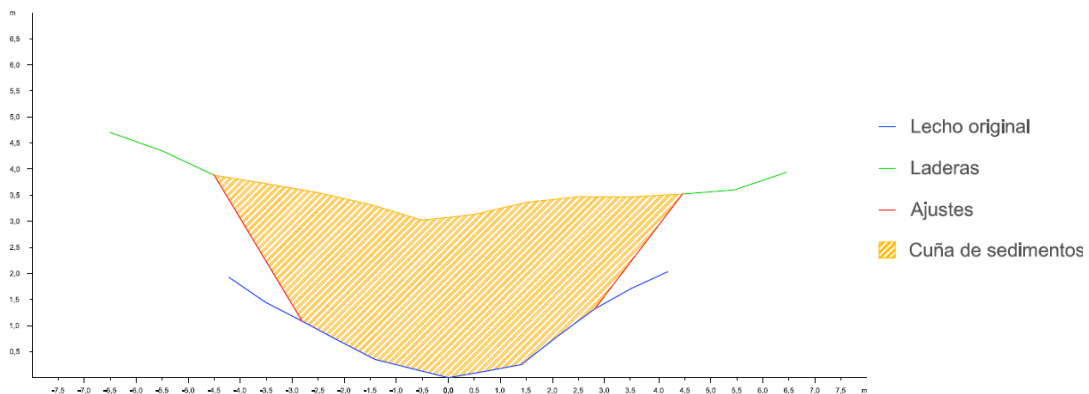


Figura A2.458. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 110

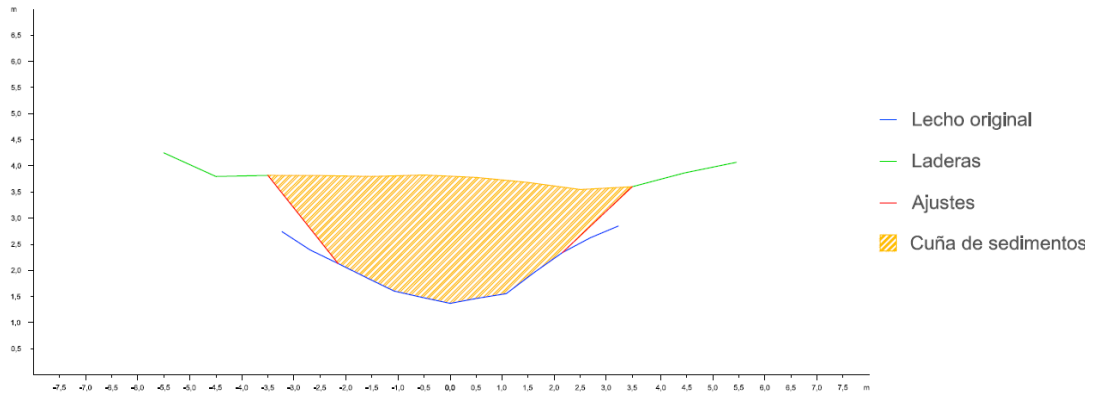


Figura A2.459. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 110

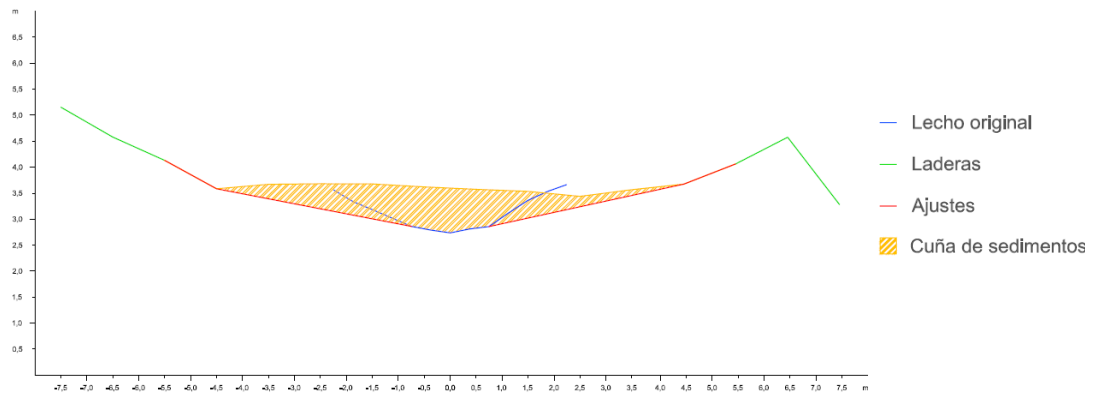


Figura A2.460. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 110

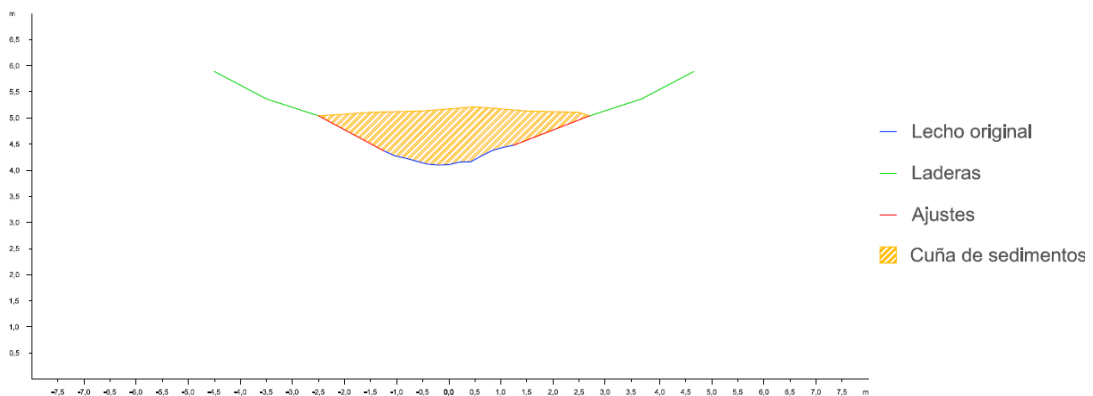


Figura A2.461. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 110

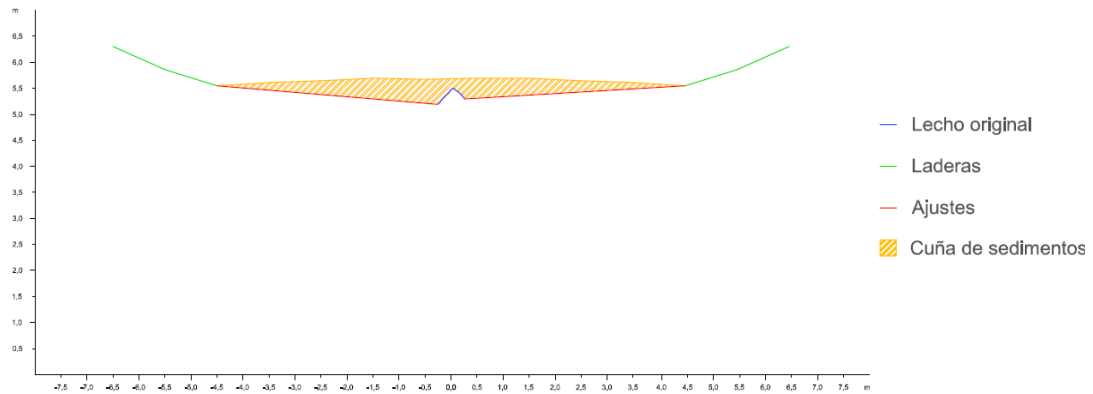


Figura A2.462. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 110

Dique 111

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 111 (Tabla A2.102) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.463 a A2.466).

Tabla A2.102. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 111

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	6,9866	11,7173	1	18,5421	18,9228
2		4,7307		3		
2	2,0	4,7307	6,6344	2	8,6134	7,6148
3		1,9037		4		
3	2,0	1,9037	2,4783	3	2,6963	2,2122
4		0,5746		Fin cuña		
4	1,85	0,5746	0,5315	Opción 1	21,2384	21,1350
Fin cuña		0,0000		Opción 2	20,8622	19,8636
Volumen total			21,3615		21,0503	20,4993
Errores			A ₁ = 0,3112		A ₂ = -0,5510	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

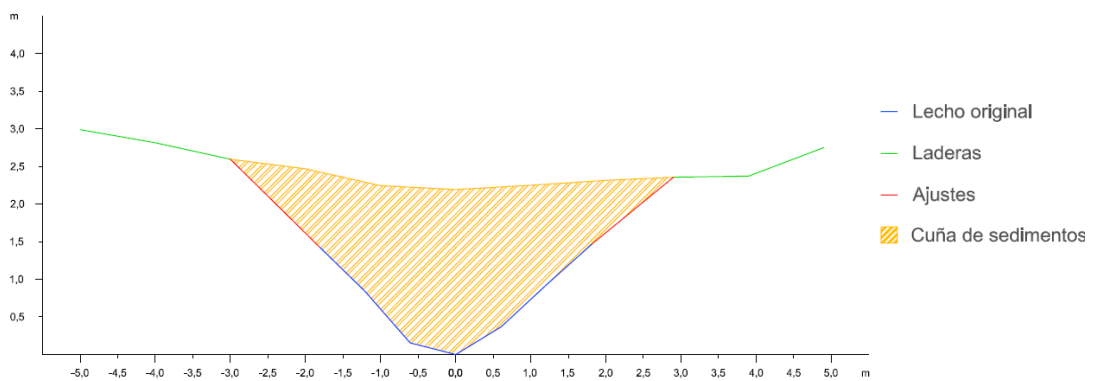


Figura A2.463. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 111

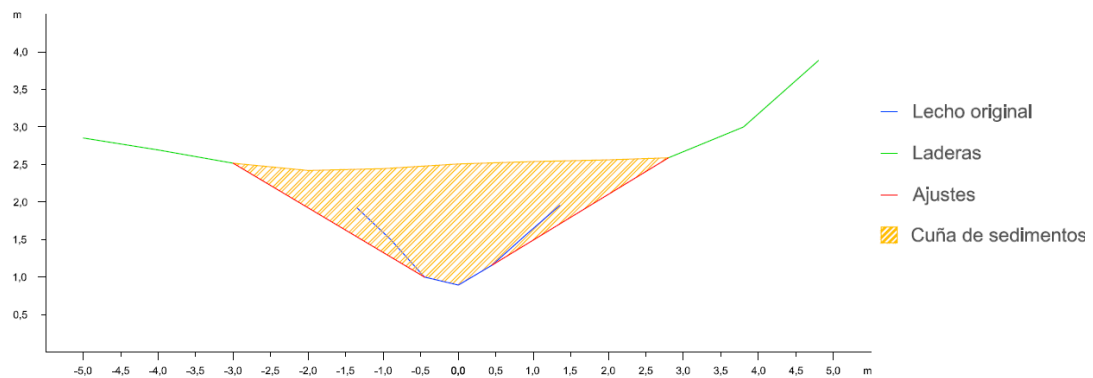


Figura A2.464. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 111

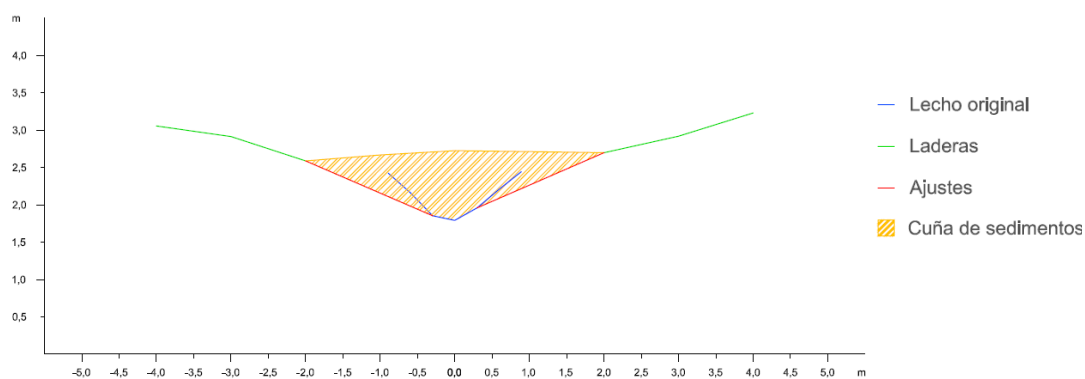


Figura A2.465. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 111

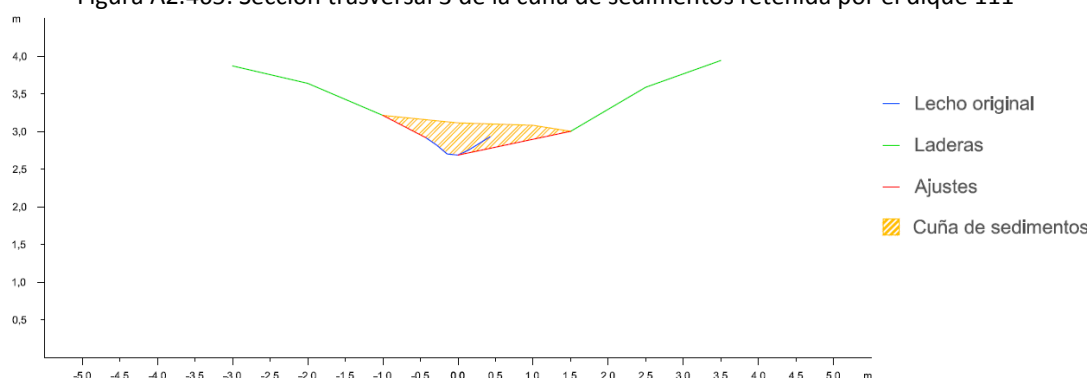


Figura A2.466. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 111

Dique 112

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 112 (Tabla A2.103) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.467 a A2.470).

Tabla A2.103. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 112

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	8,7575	17,7647	1	22,3217	18,5136
2		3,0856		3		
2	3,0	3,0856	6,4611	2	8,1420	7,3308
3		1,2218		4		
3	3,0	1,2218	2,0865	3	1,6455	0,8798
4		0,1692		Fin cuña		
4	2,20	0,1692	0,1861	Opción 1	23,9672	19,3934
Fin cuña		0,0000		Opción 2	26,0928	25,2816
Volumen total			26,4984		25,0300	22,3375
Errores			A ₁ = 1,4684		A ₂ = -2,6925	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

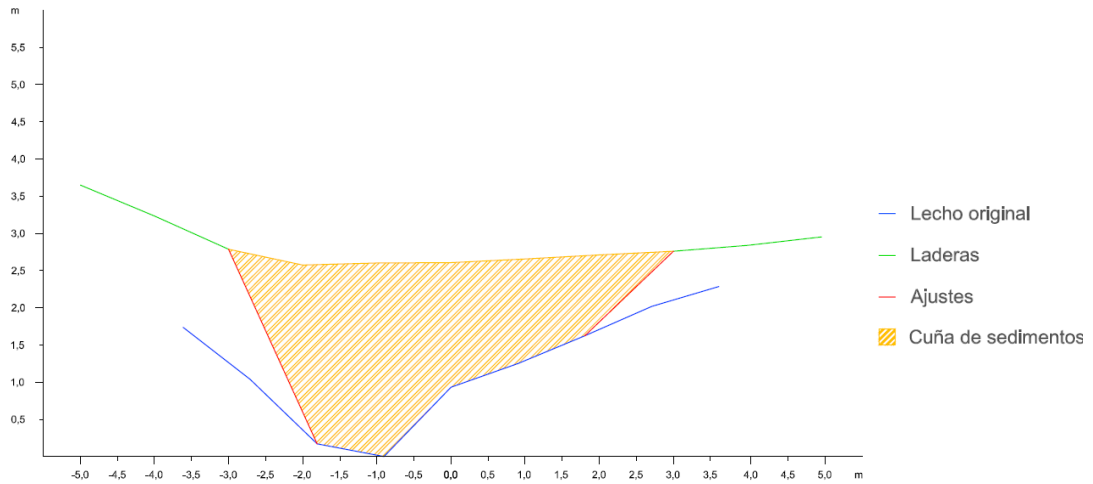


Figura A2.467. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 112

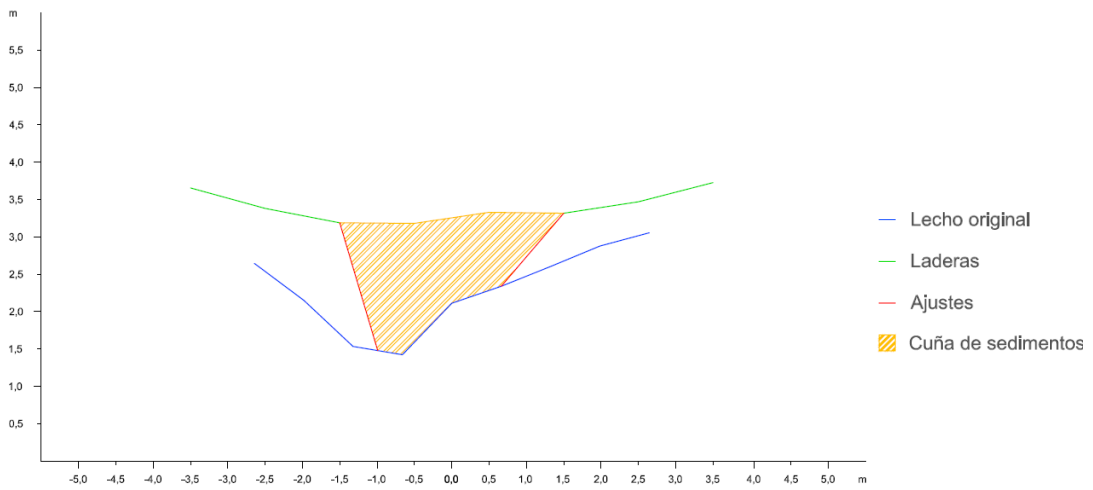


Figura A2.468. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 112

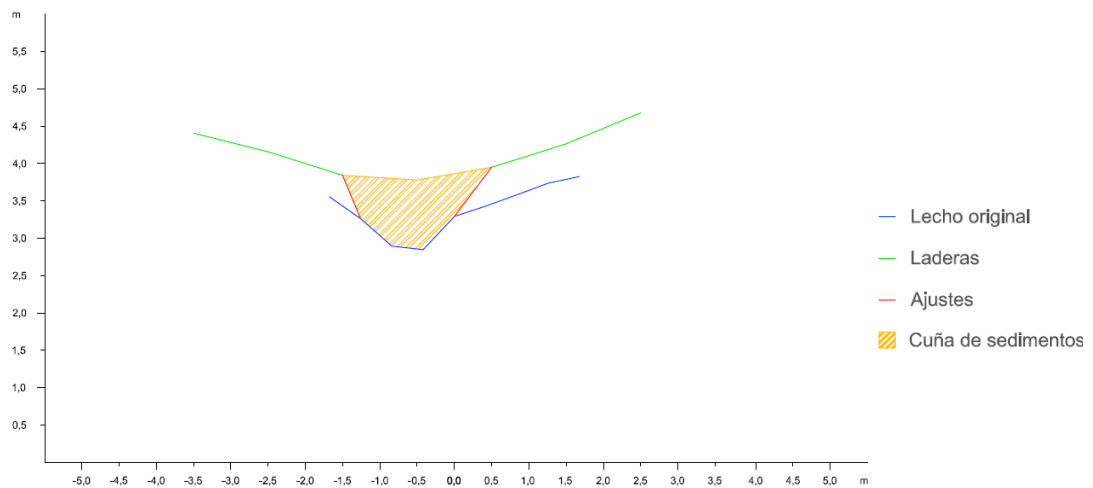


Figura A2.469. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 112

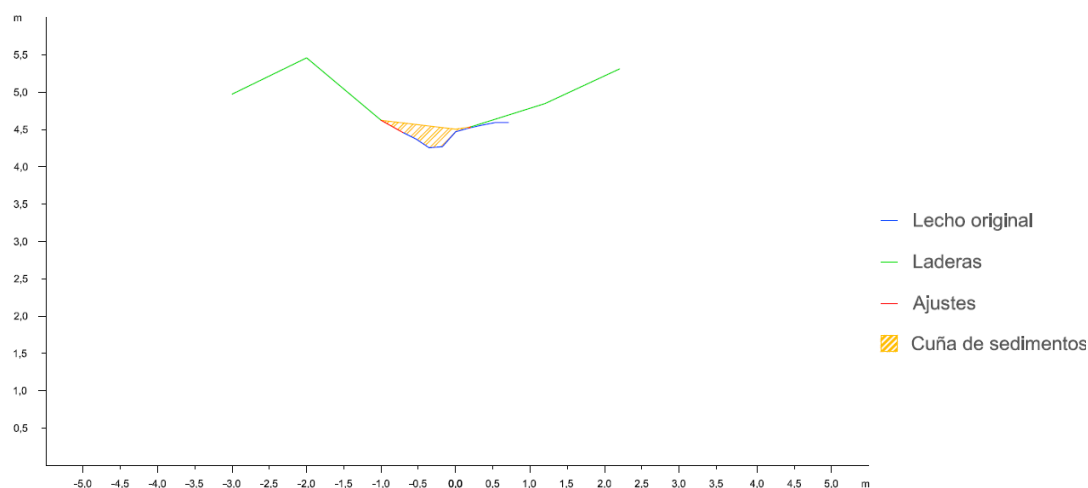


Figura A2.470. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 112

Dique 113

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 113 (Tabla A2.104) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.471 a A2.476).

Tabla A2.104. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	6,4309	14,2721	1	21,2093	18,5028
2		3,0838		3		
2	3,0	3,0838	8,2905	2	14,3479	14,6592
3		2,4432		4		
3	3,0	2,4432	5,9018	3	9,3462	8,9478
4		1,4913		5		
4	3,0	1,4913	3,6437	4	5,6629	5,6268
5		0,9378		6		
5	3,0	0,9378	2,0373	5	1,4843	1,4294
6		0,4204		Fin cuña		
6	0,4	0,4204	0,0841	Opción 1	32,0398	28,8800
Fin		0,0000		Opción 2		
Volumen total			34,2293		33,2034	31,7610
Errores			A₁= 1,0260		A₂= -1,4423	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

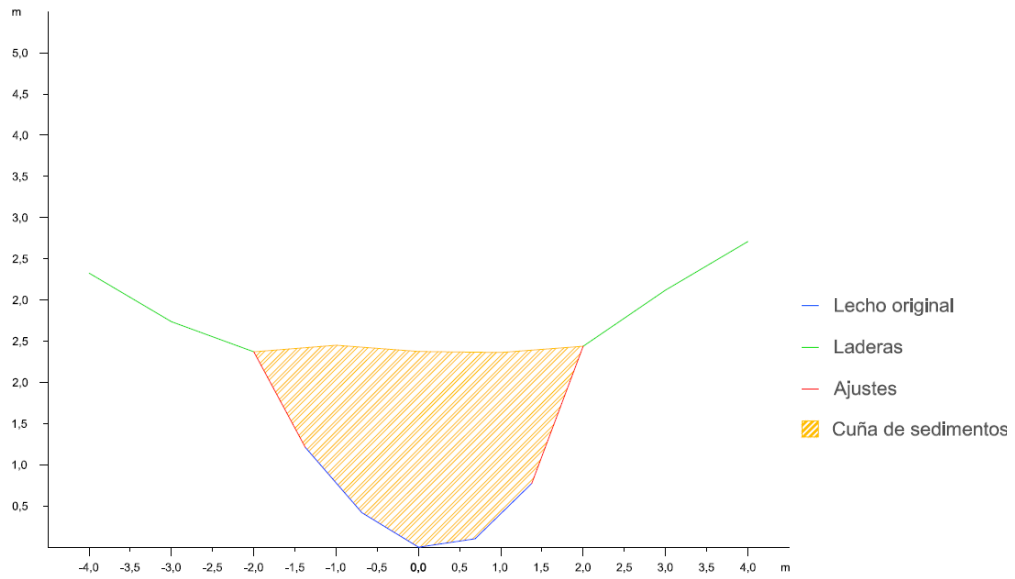


Figura A2.471. Sección trasversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

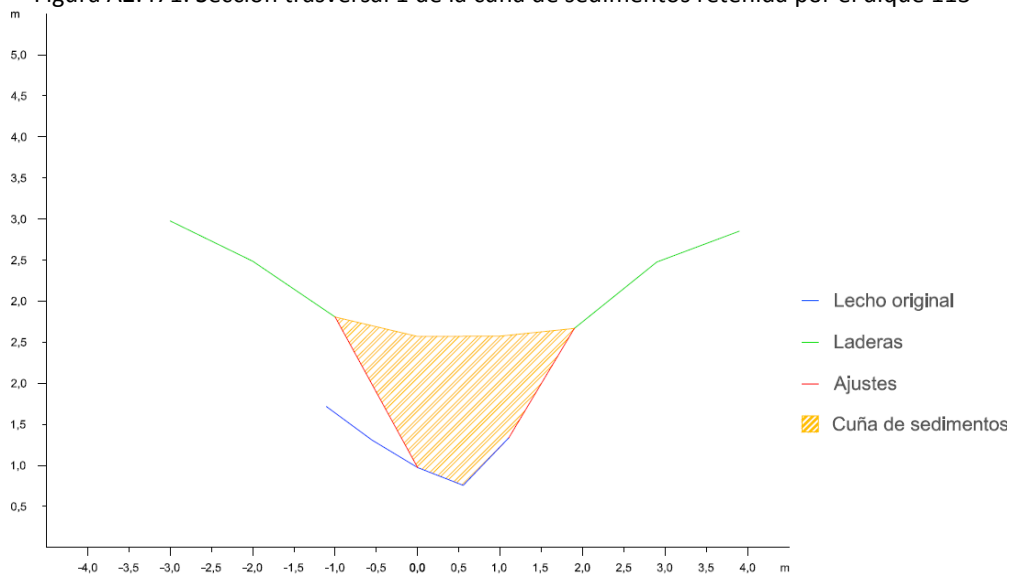


Figura A2.472. Sección trasversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

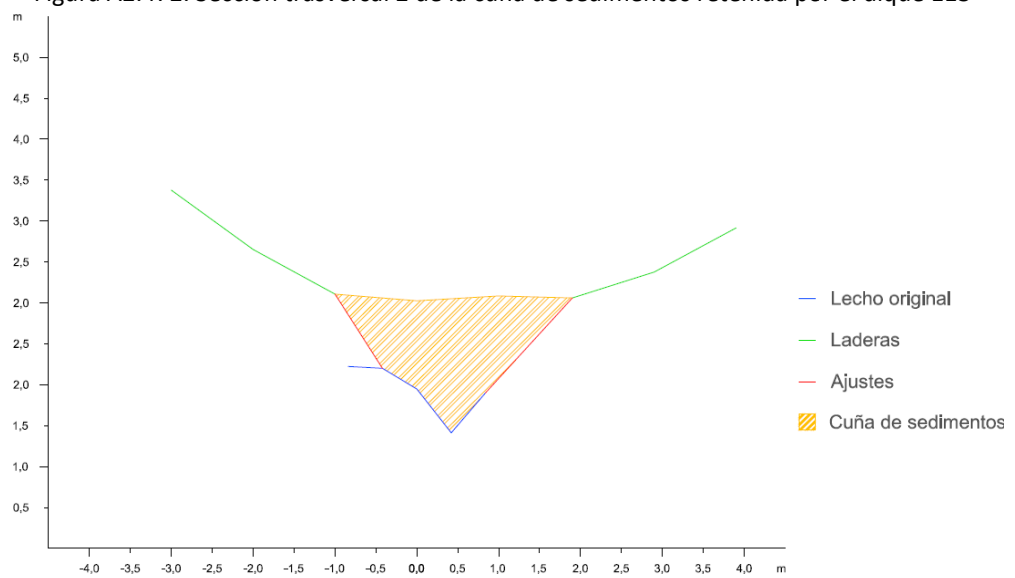


Figura A2.473. Sección trasversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

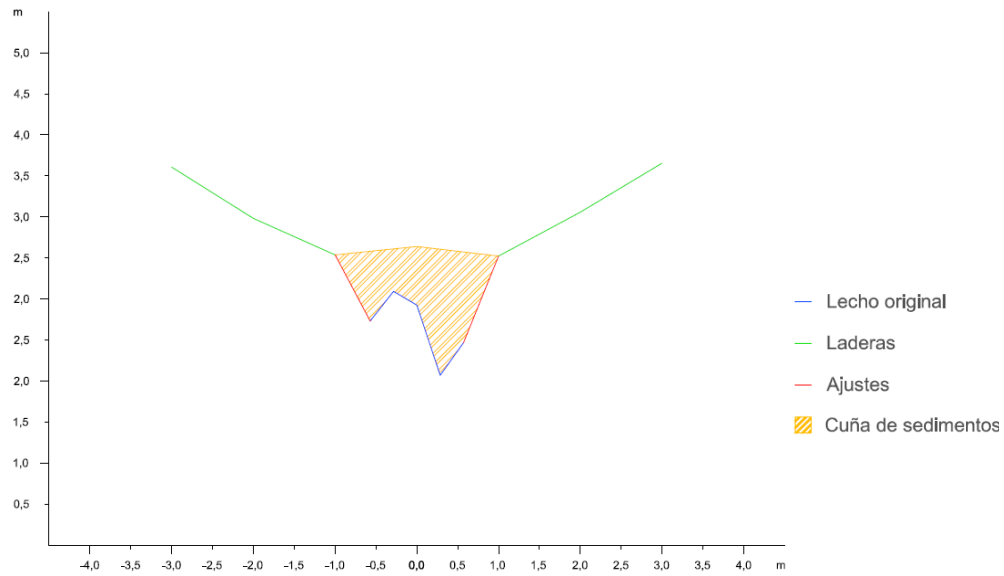


Figura A2.474. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

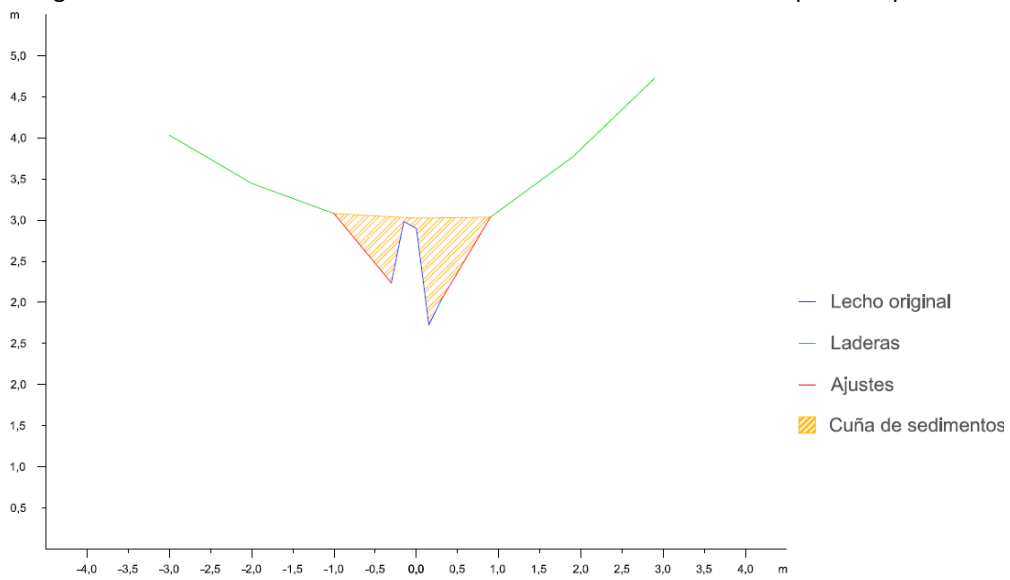


Figura A2.475. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

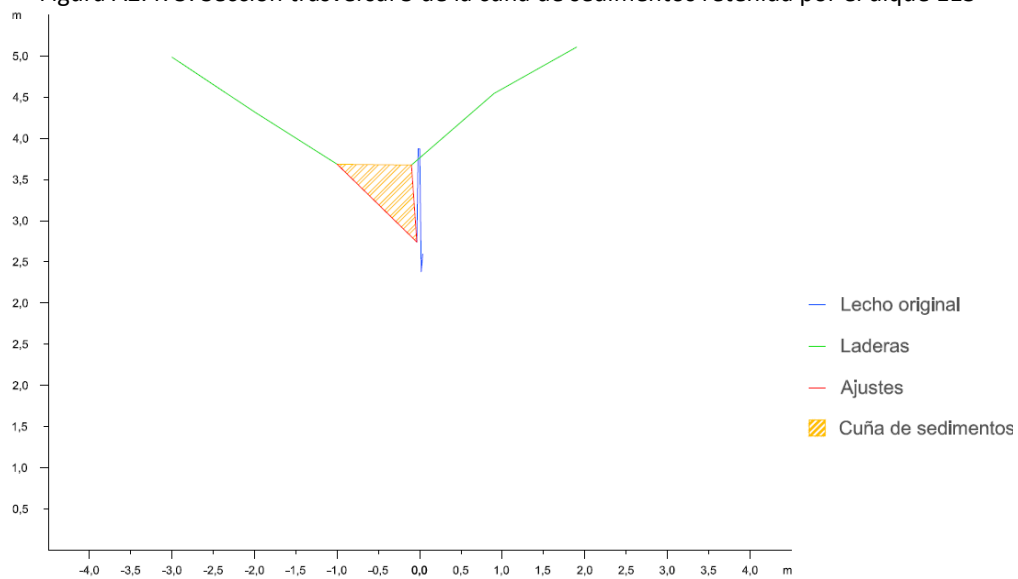


Figura A2.476. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 113

Dique 114

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 114 (Tabla A2.105) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.477 a A2.482).

Tabla A2.105. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	25,0978	66,4835	1	111,1945	115,3470
2		19,2245		3		
2	3,0	19,2245	42,6348	2	60,7716	55,1922
3		9,1987		4		
3	3,0	9,1987	20,9265	3	29,7392	28,5138
4		4,7523		5		
4	3,0	4,7523	9,4254	4	11,0096	9,1878
5		1,5313		6		
5	3,0	1,5313	2,4951	5	1,1672	0,4491
6		0,1321		Fin cuña		
6	0,4	0,1321	0,0264	Opción 1	142,1009	144,3099
Fin		0,0000		Opción 2		
Volumen total			141,9917		140,1960	137,5999
Errores			A ₁ = 1,7957		A ₂ = -2,5961	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismaide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismaide y con la fórmula de la sección media

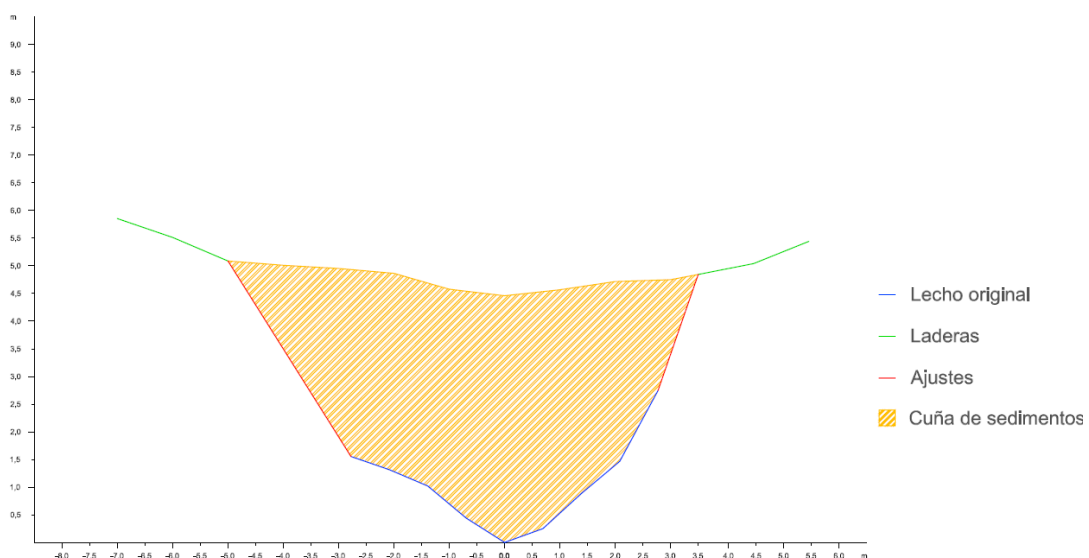


Figura A2.477. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

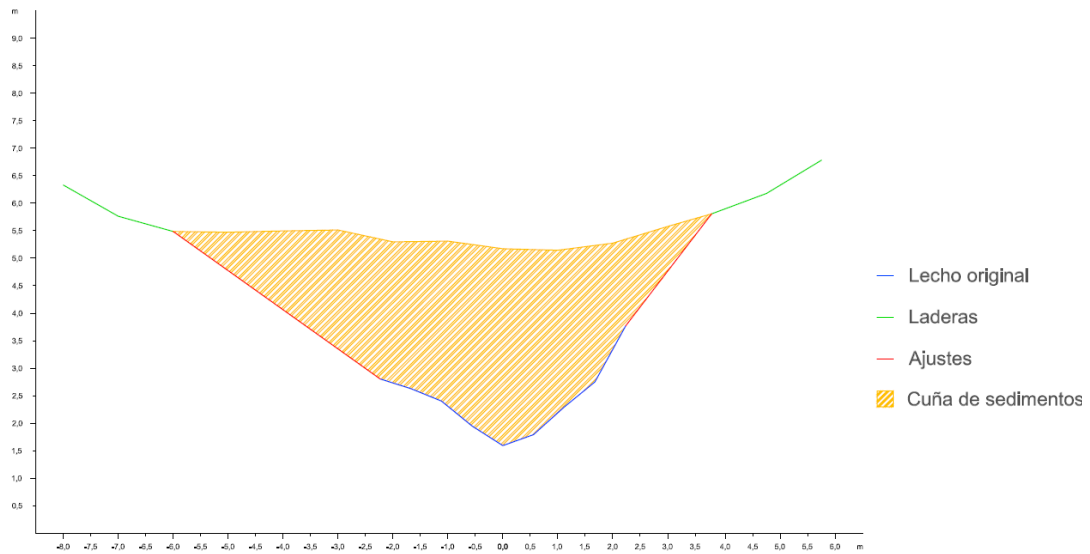


Figura A2.478. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

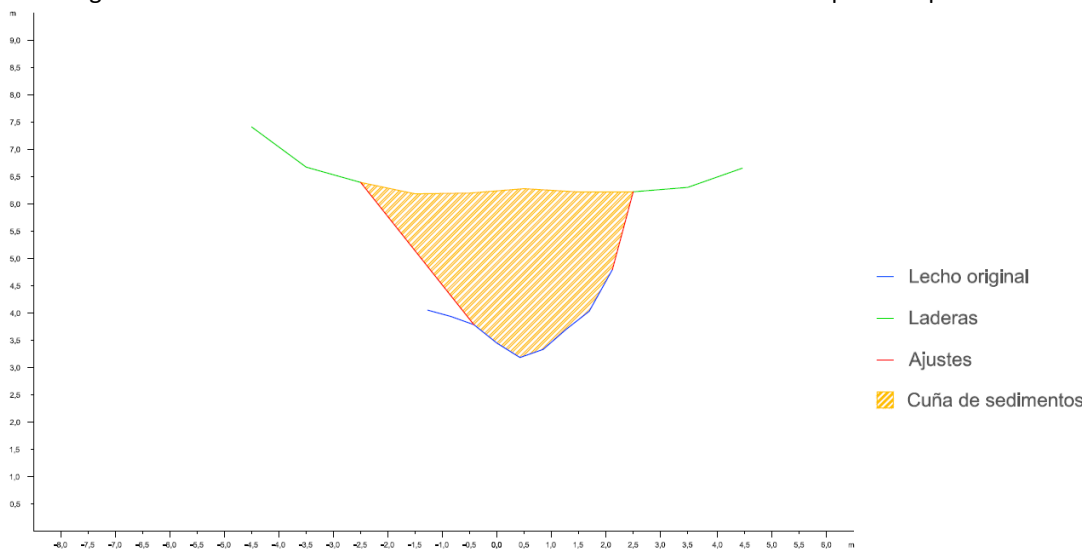


Figura A2.479. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

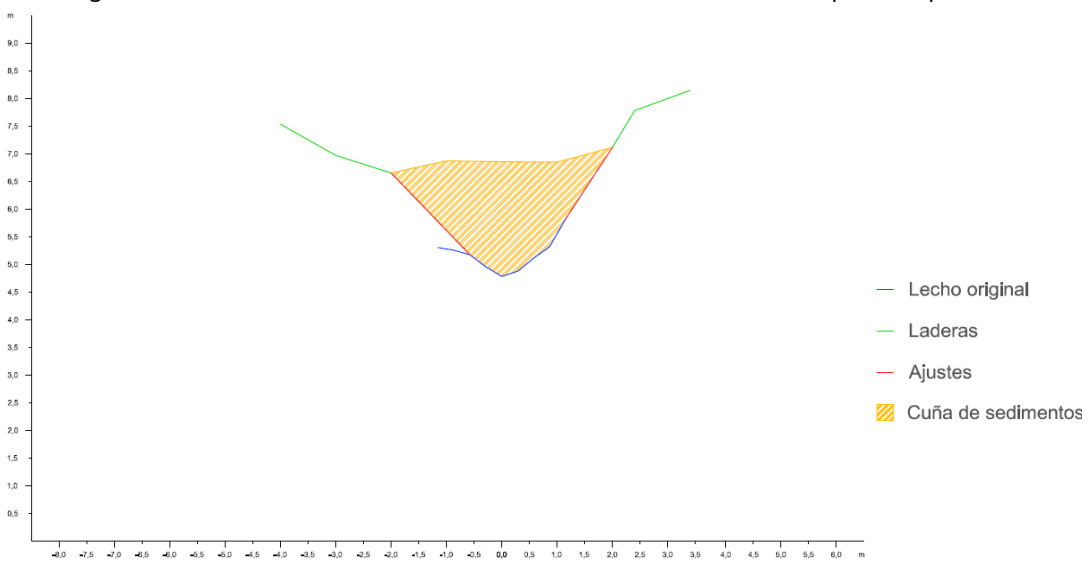


Figura A2.480. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

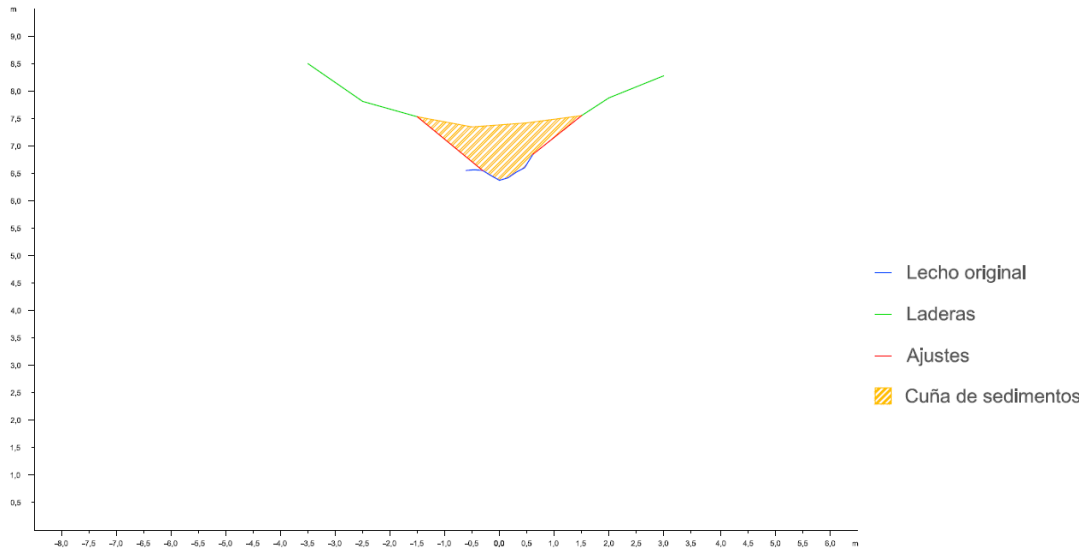


Figura A2.481. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

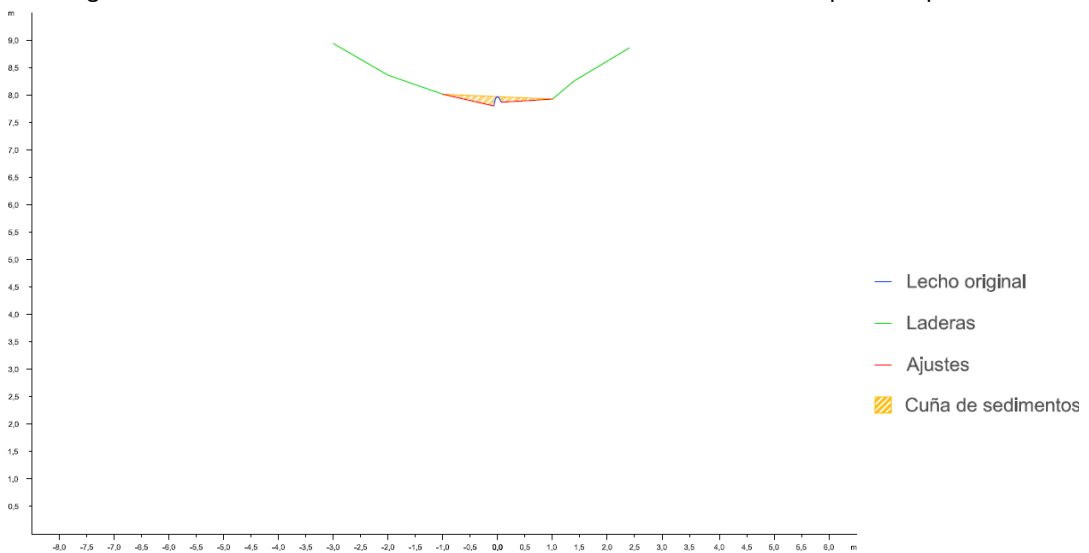


Figura A2.482. Sección transversal 6 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 114

Dique 116

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 116 (Tabla A2.106) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.483 a A2.485).



Tabla A2.106. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 116

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	6,6586	9,2792	1	11,7443	10,4824
2		2,6206		3		
2	2,0	2,6206	3,0960	2	2,8641	1,8065
3		0,4754		Fin cuña		
3	1,80	0,4754	0,4279	Opción 1	12,1721	10,9103
Fin cuña		0,0000		Opción 2	12,1433	11,0857
Volumen total			12,80306		12,1577	10,9980
Errores			A₁= 0,6454		A₂= -1,1597	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

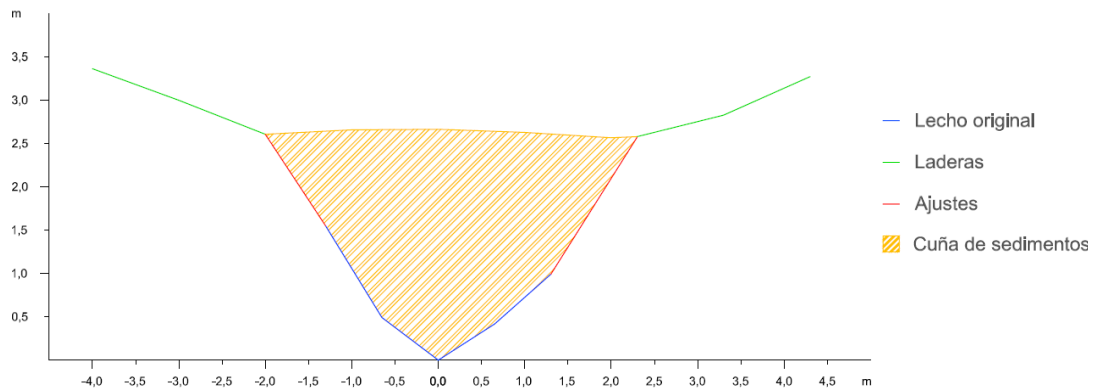


Figura A2.483. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 116

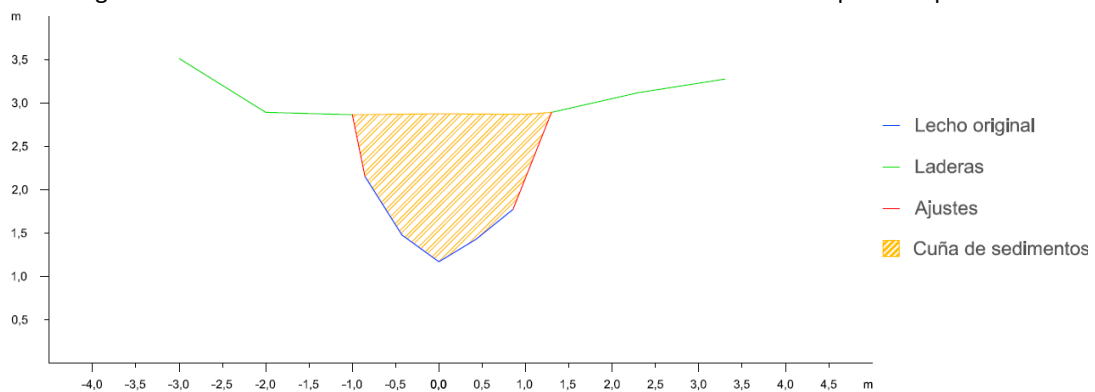


Figura A2.484. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 116

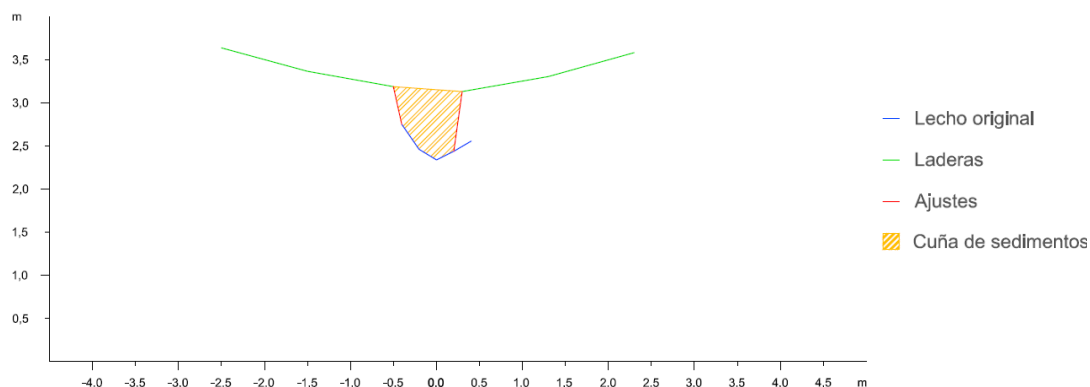


Figura A2.485. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 116

Dique 117

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 117 (Tabla A2.107) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.486 a A2.490).

Tabla A2.107. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 117

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	10,6499	25,5290	1	38,5211	38,2164
2		6,3694		3		
2	3,0	6,3694	13,1445	2	16,8177	14,3616
3		2,3936		4		
3	3,0	2,3936	4,9013	3	5,9266	5,2434
4		0,8739		5		
4	3,0	0,8739	1,3670	4	0,6653	0,1459
5		0,0374		Fin cuña		
5	0,9	0,0374	0,0168	Opción 1	44,4645	43,4766
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			44,9585		43,7382	41,7565
Errores			A ₁ = 1,2203		A ₂ = -1,9817	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

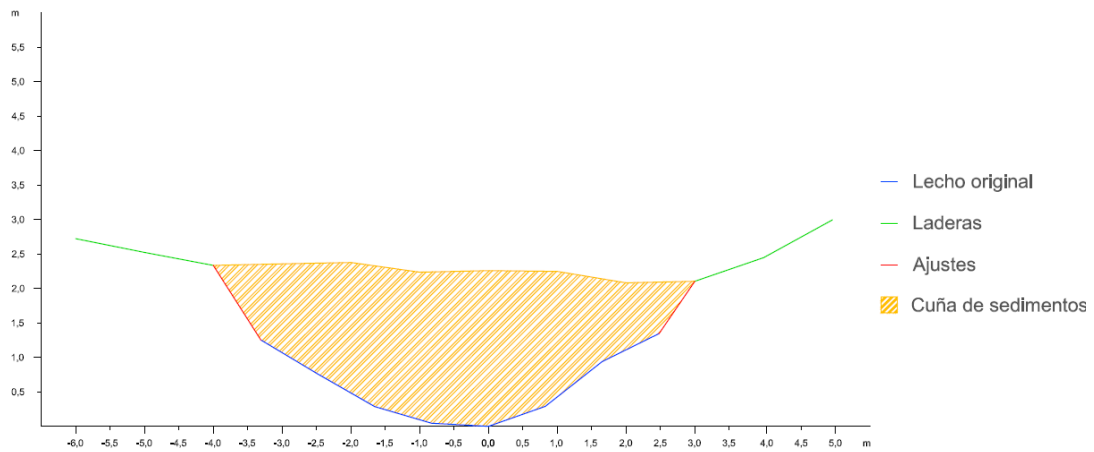


Figura A2.486. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 117

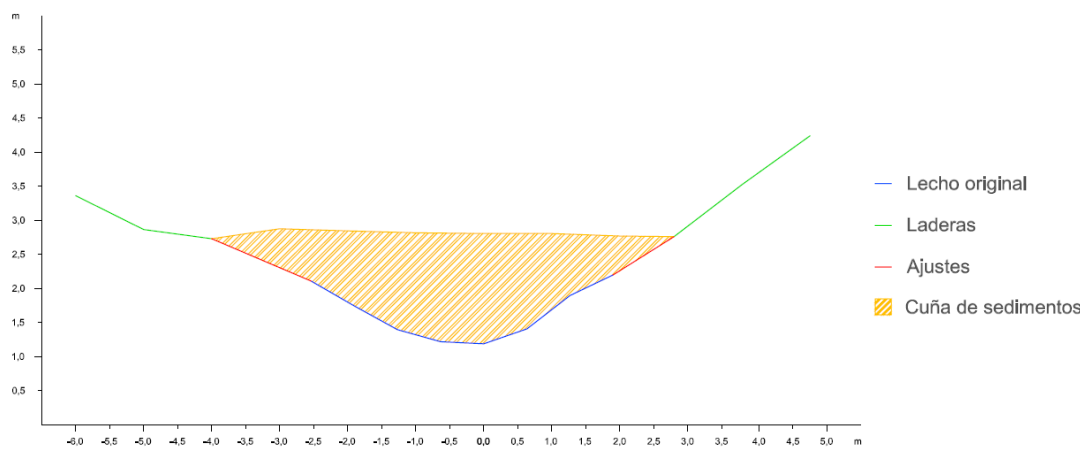


Figura A2.487. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 117

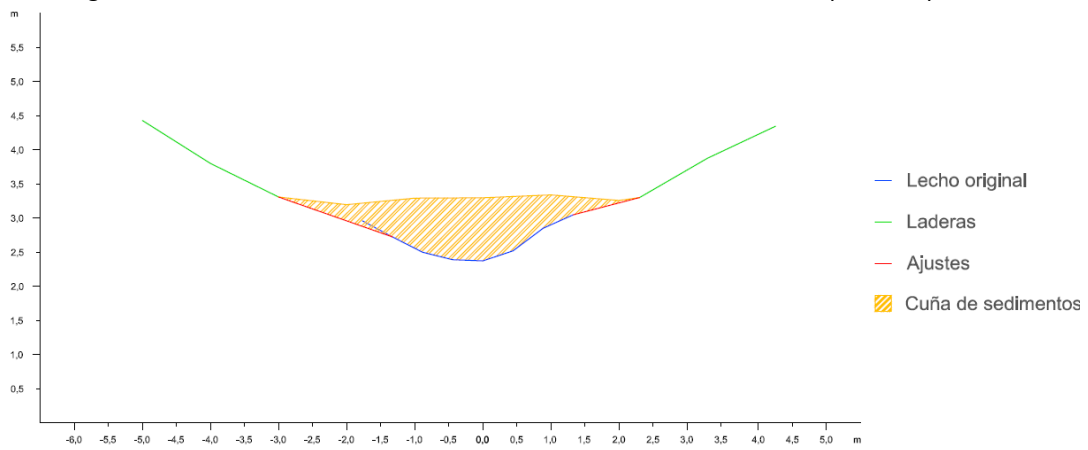


Figura A2.488. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 117

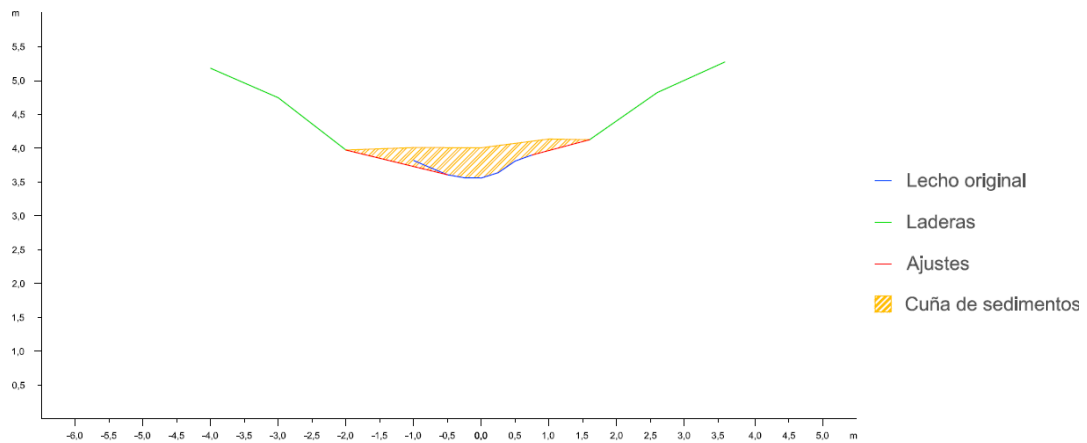


Figura A2.489. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 117

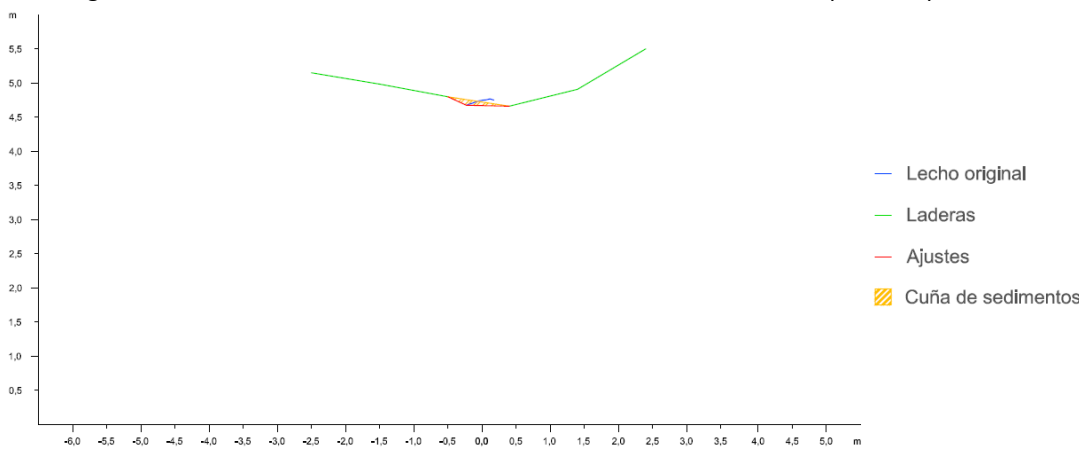


Figura A2.490. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 117

Dique 118

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 118 (Tabla A2.108) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.491 a A2.494).

Tabla A2.108. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 118

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	2,6805	5,6019	1	7,0112	6,3246
2		1,0541		3		
2	3,0	1,0541	1,7526	2	1,5468	0,6858
3		0,1143		4		
3	3,0	0,1143	0,2247	3	0,2008	0,1669
4		0,0355		Fin cuña		
4	1,70	0,0355	0,0302	Opción 1	7,2120	6,4915
Fin cuña		0,0000		Opción 2	7,1789	6,3179
Volumen total			7,6094		7,1954	6,4047
Errores			A ₁ = 0,4140		A ₂ = -0,7908	



V_{MSE} : Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p : Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM} : Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A_1 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A_2 : Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

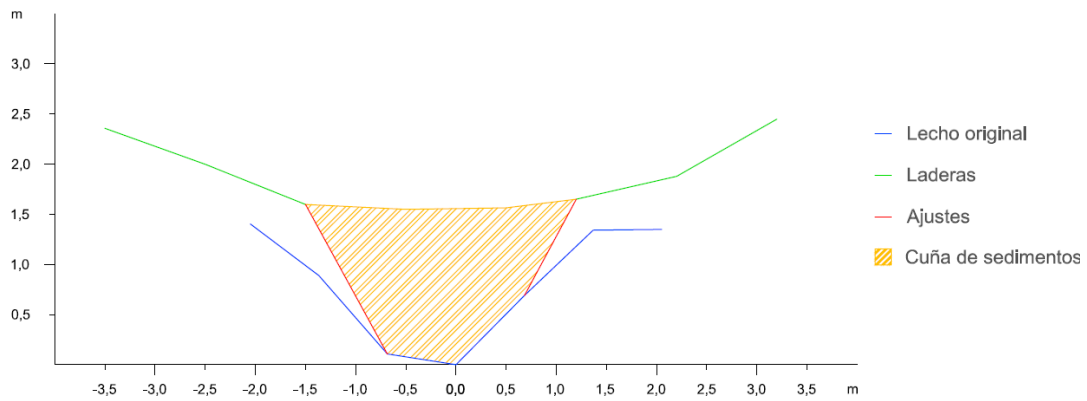


Figura A2.491. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 118

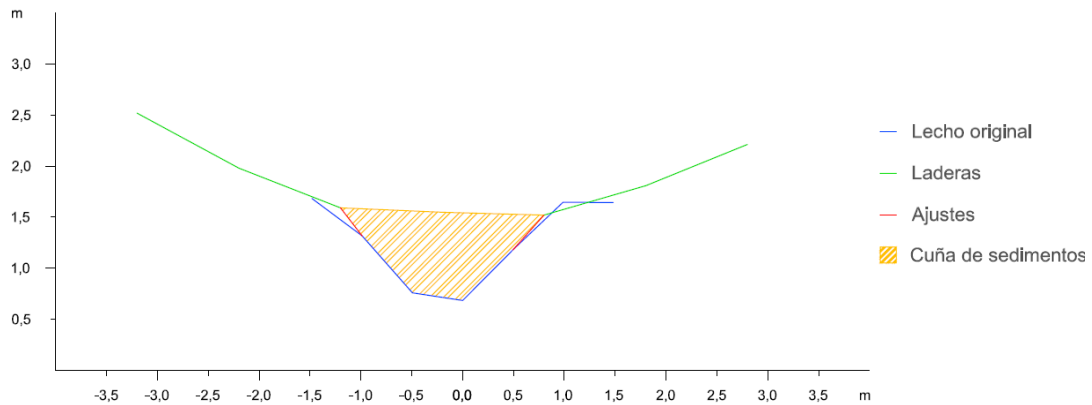


Figura A2.492. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 118

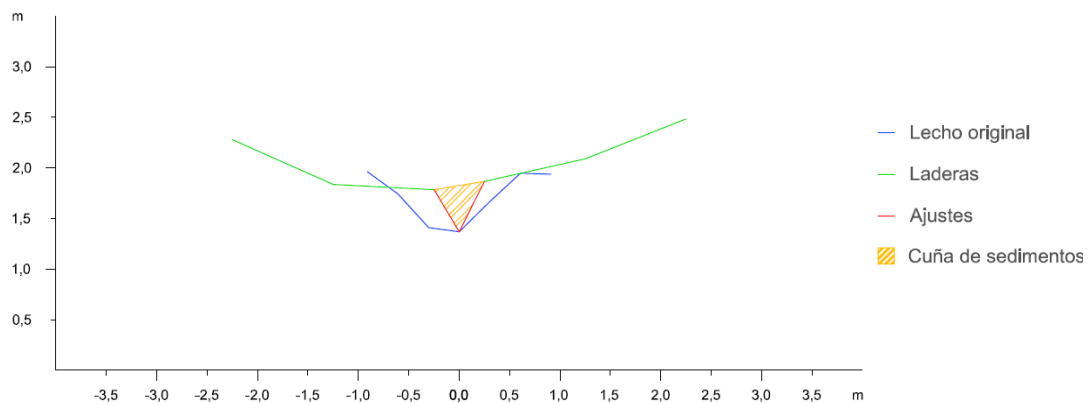


Figura A2.493. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 118

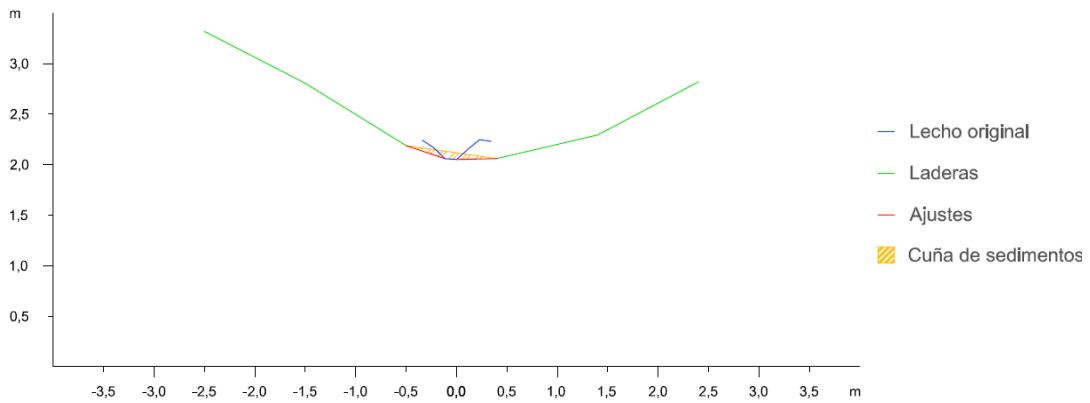


Figura A2.494. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 118

Dique 119

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 119 (Tabla A2.109) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.495 a A2.496).

Tabla A2.109. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 119

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	9,0	8,5365	46,8131	1	28,5371	19,9705
2		1,8664		3		
2	1,7	TOTAL	48,3995	Opción 1	—	—
Fin cuña		0,0000		Opción 2	—	—
Volumen total			48,39949		28,5371	19,9705
Errores			A ₁ = 19,8624		A ₂ = -8,5666	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

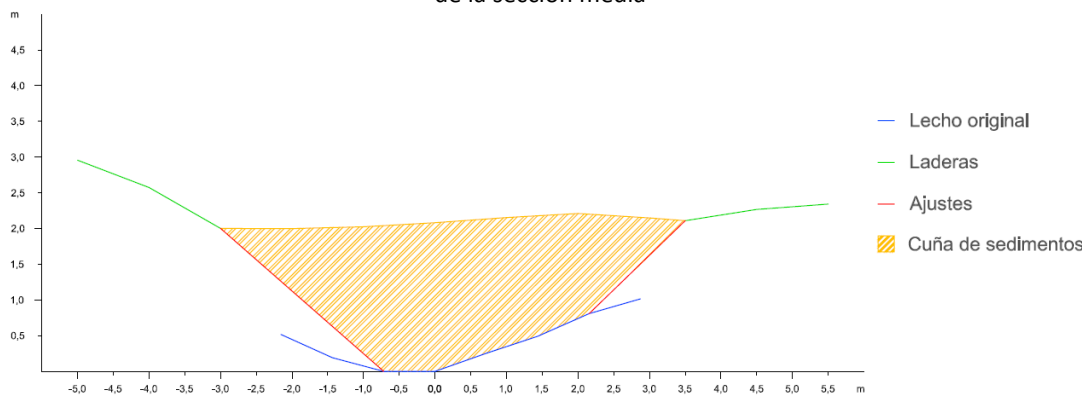


Figura A2.495. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 119

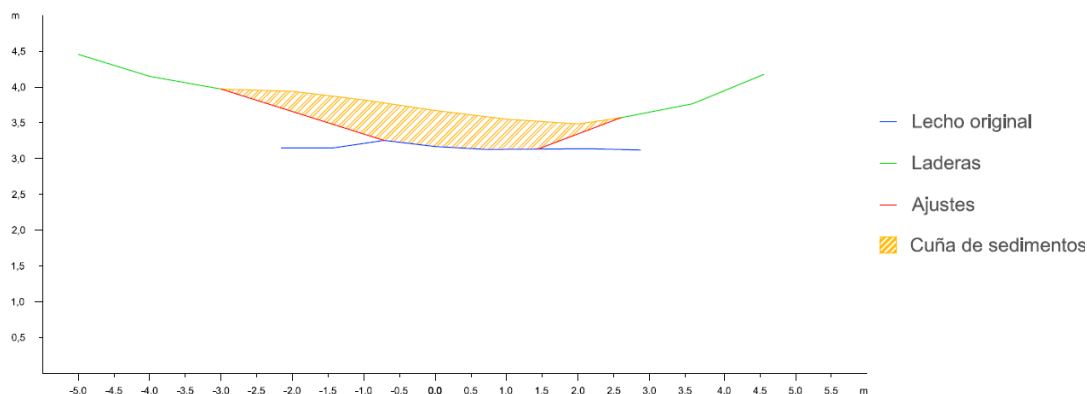


Figura A2.496. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 119

Dique 120

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 120 (Tabla A2.110) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.497 a A2.499).

Tabla A2.110. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 120

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	7,1646	9,6694	1	11,8188	10,0192
2		2,5048		3		
2	2,0	2,5048	3,0492	2	3,1216	2,1776
3		0,5444		Fin cuña		
3	2,00	0,5444	0,5444	Opción 1	12,3632	10,5636
Fin cuña		0,0000		Opción 2	12,7910	11,8470
Volumen total			13,263		12,5771	11,2053
Errores			A ₁ = 0,6859		A ₂ = -1,3718	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de la secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

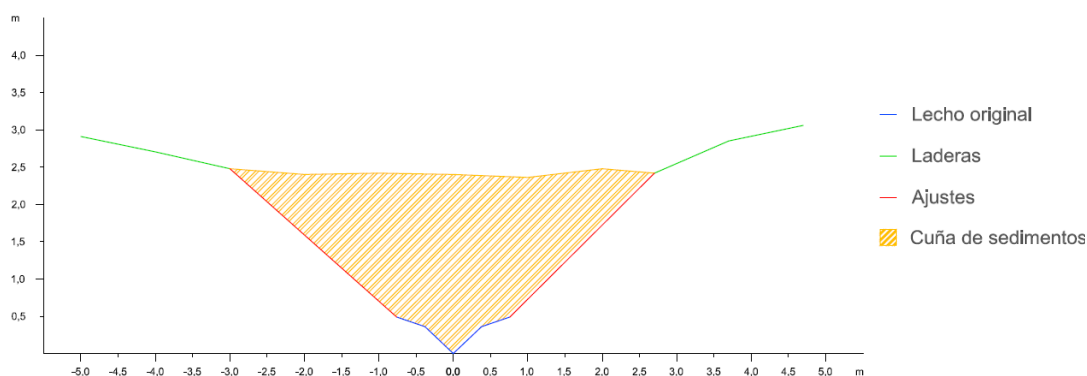


Figura A2.497. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 120

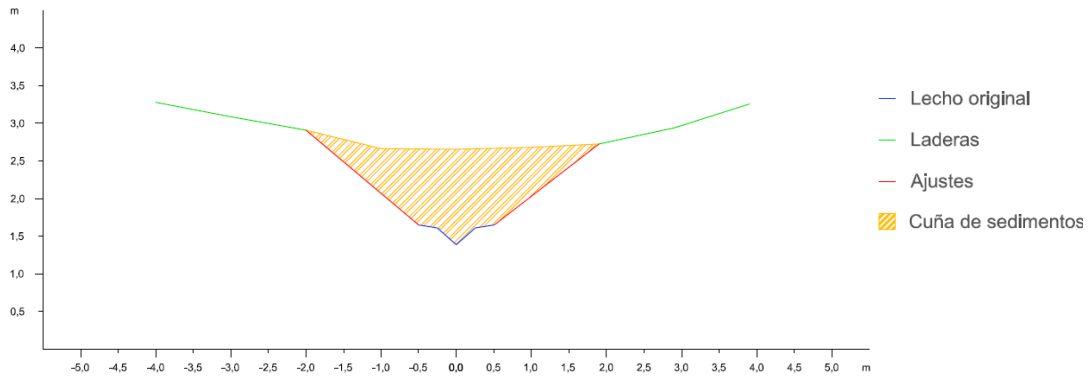


Figura A2.498 Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 120

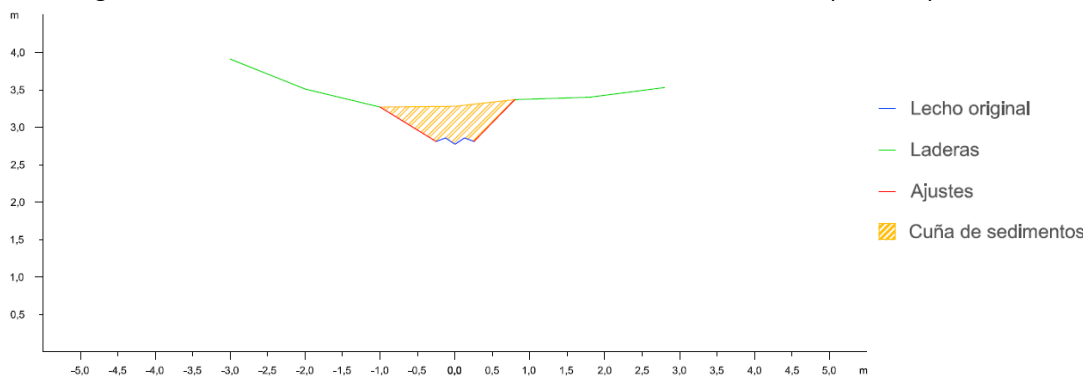


Figura A2.499. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 120

Dique 121

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 121 (Tabla A2.111) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.500 a A2.503).

Tabla A2.111. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 121

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _p (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	5,2098	8,4975	1	13,5046	13,1508
2		3,2877		3		
2	2,0	3,2877	5,1840	2	7,5697	7,5852
3		1,8963		4		
3	2,0	1,8963	2,3780	3	2,5487	1,9268
4		0,4817		Fin cuña		
4	2,00	0,4817	0,4817	Opción 1	16,0533	15,0776
Fin cuña		0,0000		Opción 2	16,5489	16,5644
Volumen total					16,3011	15,8210
Errores			A ₁ = 0,2401	A ₂ = -0,4801		

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_p: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

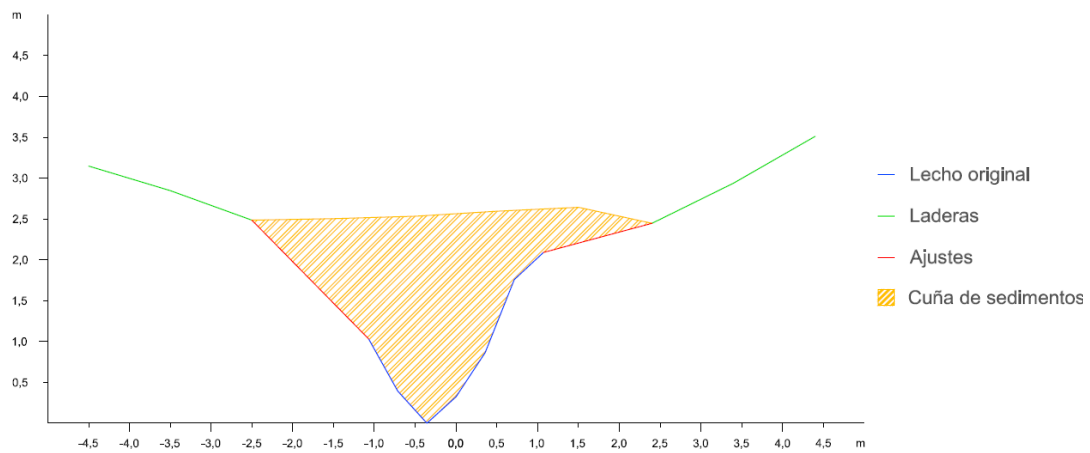


Figura A2.500. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121

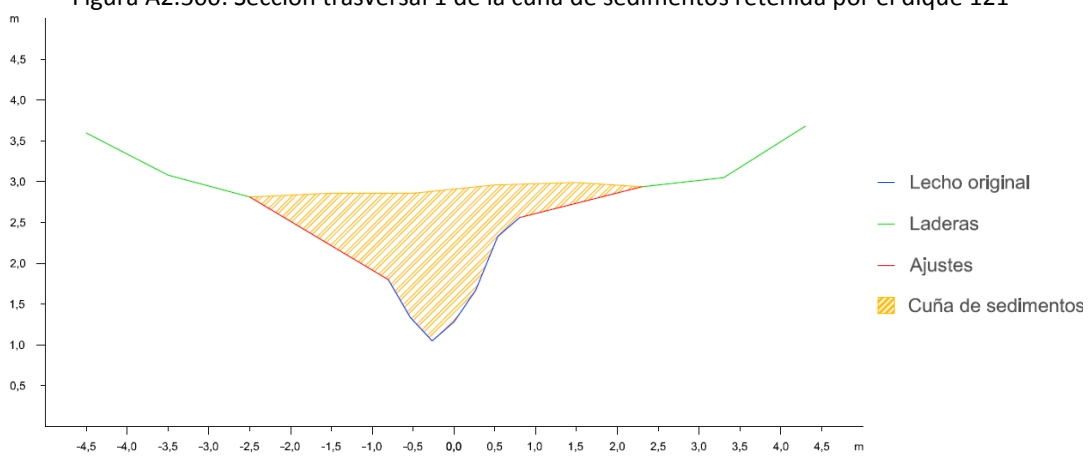


Figura A2.501. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121

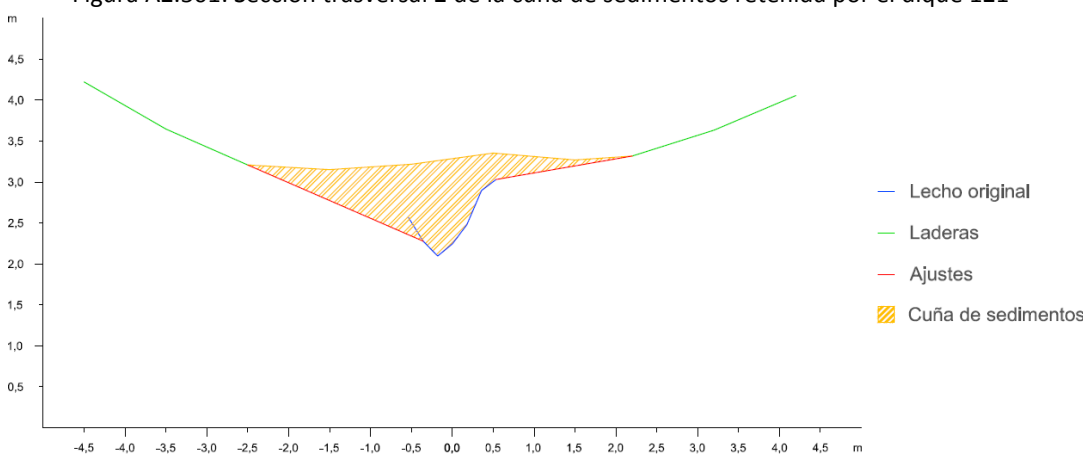


Figura A2.502. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121

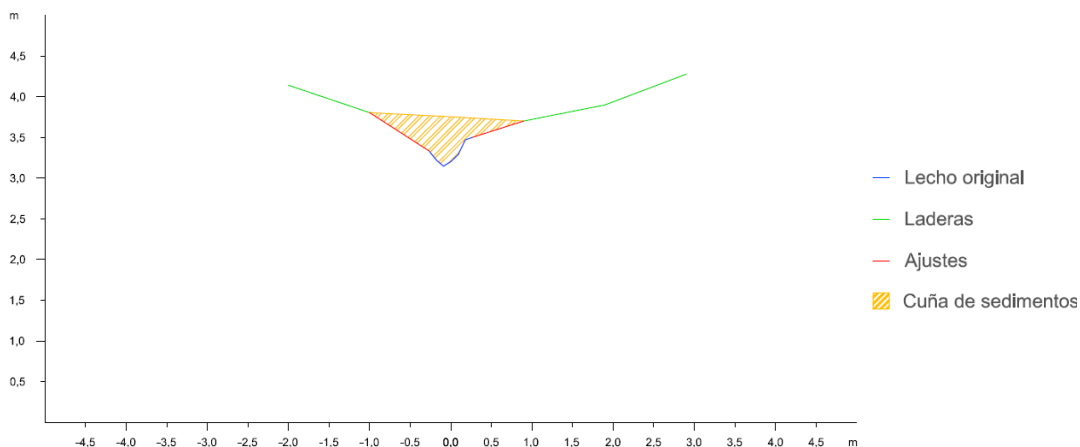


Figura A2.503. Sección trasversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 121

Dique 122

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 122 (Tabla A2.112) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.504 a A2.508).

Tabla A2.112. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 122

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	2,0	8,2639	13,2914	1	20,8465	20,1100
2		5,0275		3		
2	2,0	5,0275	7,9234	2	11,8138	11,5836
3		2,8959		4		
3	2,0	2,8959	4,0055	3	5,1598	4,4384
4		1,1096		5		
4	2,0	1,1096	1,5150	4	1,7298	1,5405
5		0,4054		Fin cuña		
5	1,8	0,4054	0,3649	Opción 1	26,3712	24,9133
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			27,1002		26,6031	25,6644
Errores			A ₁ = 0,4971		A ₂ = -0,9387	

V_{MSE}: Volumen de la cuña de sedimentos obtenido por aplicación de la fórmula de la media de las secciones extremas; V_P: Volumen por aplicación de la fórmula del prismoide; V_{SM}: Volumen por aplicación de la fórmula de la sección media; A₁: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la media de las secciones extremas; A₂: Error resultante de la diferencia entre los volúmenes obtenidos con la fórmula del prismoide y con la fórmula de la sección media

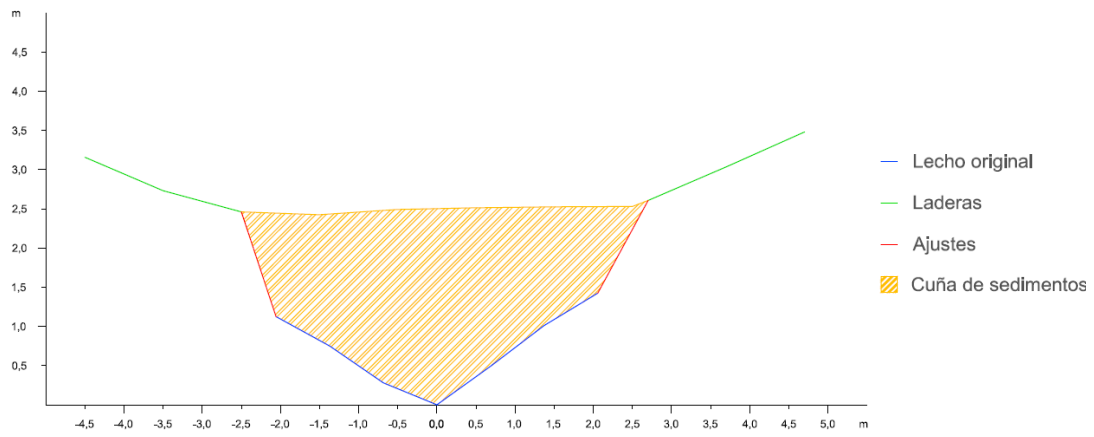


Figura A2.504. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122

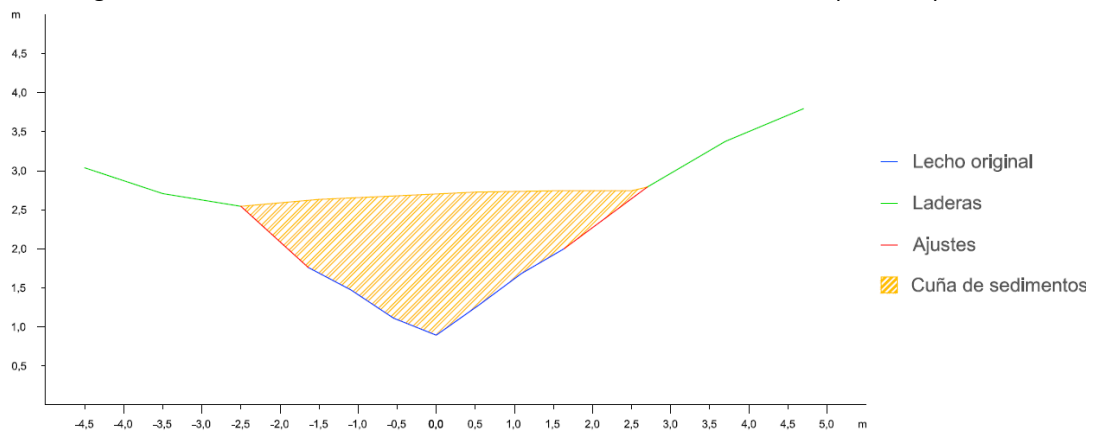


Figura A2.505. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122

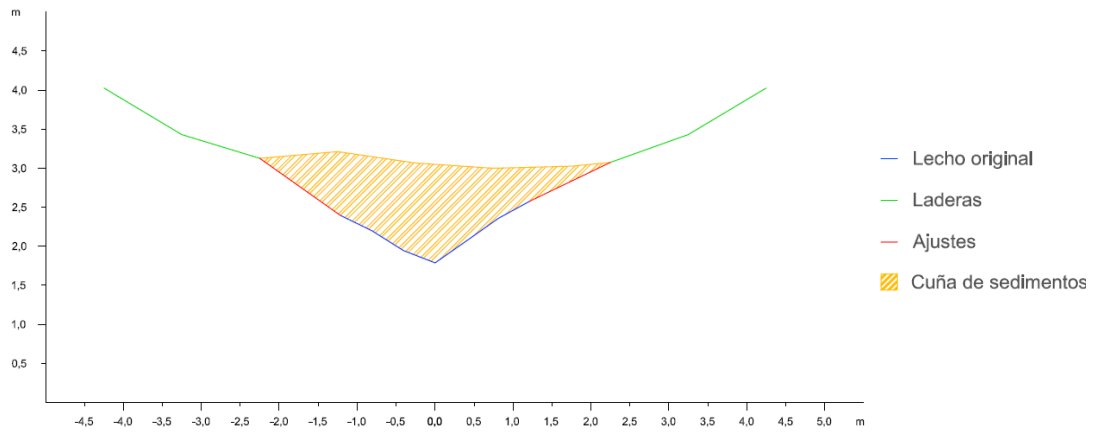


Figura A2.506. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122

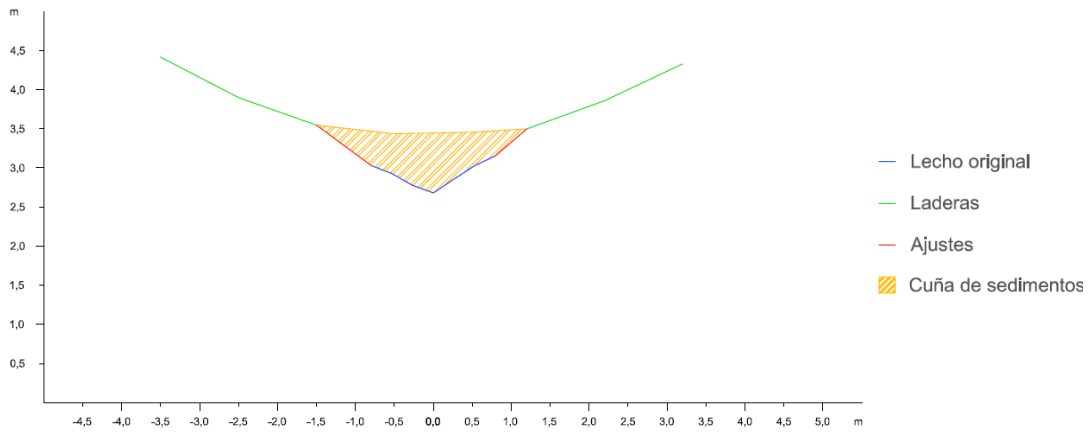


Figura A2.507. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122

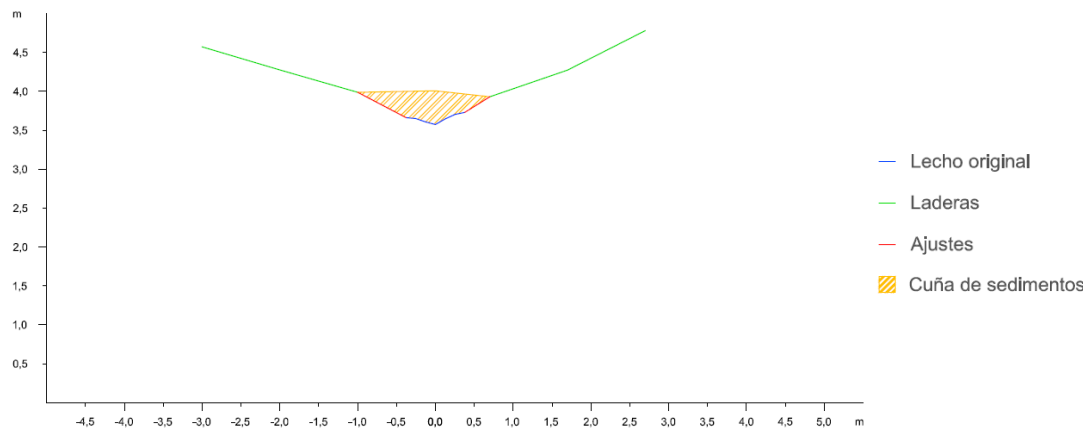


Figura A2.508. Sección transversal 5 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 122

Dique 123

En primer lugar se observan los datos y resultados numéricos de la aplicación de la metodología propuesta (Díaz *et al.*, 2014) a la cuña de sedimentos retenida por el dique 123 (Tabla A2.113) y en segundo lugar, las secciones transversales realizadas a la cuña de sedimentación, con los ajustes gráficos realizados para la obtención del área de cada sección (Figuras A2.509 a A2.512).

Tabla A2.113. Datos y resultado de la aplicación de la metodología propuesta a la cuña de sedimentos retenida por el dique 123

Sección	Distancia entre secciones (m)	Área (m ²)	V _{MSE} (m ³)	Sección	V _P (m ³)	V _{SM} (m ³)
1	3,0	3,9945	7,9661	1	9,7666	7,8972
2		1,3162		3		
2	3,0	1,3162	2,7353	2	3,4604	3,0438
3		0,5073		4		
3	3,0	0,5073	0,9335	3	0,8706	0,6210
4		0,1150		Fin cuña		
4	2,40	0,1150	0,1380	Opción 1	10,6372	8,5182
Fin cuña		0,0000		Opción 2		
Volumen total			11,7728		11,1008	9,8330
Errores			A ₁ = 0,6719		A ₂ = -1,2678	

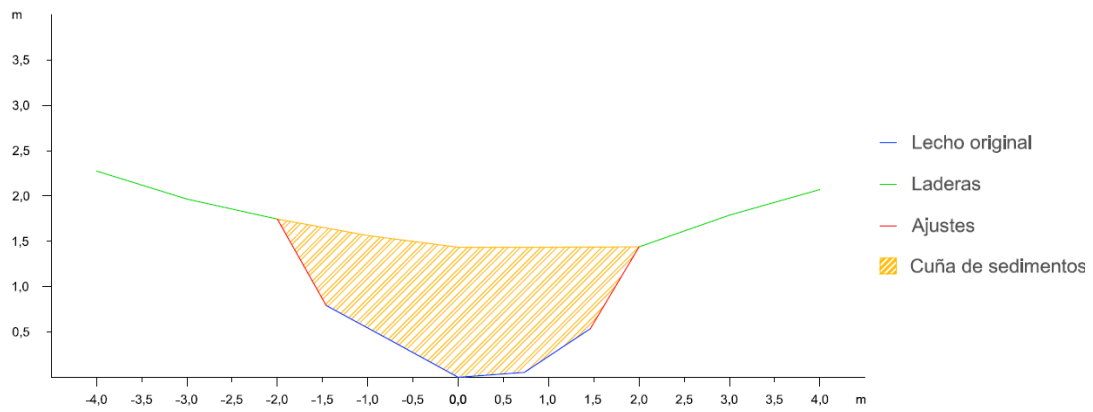


Figura A2.509. Sección transversal 1 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123

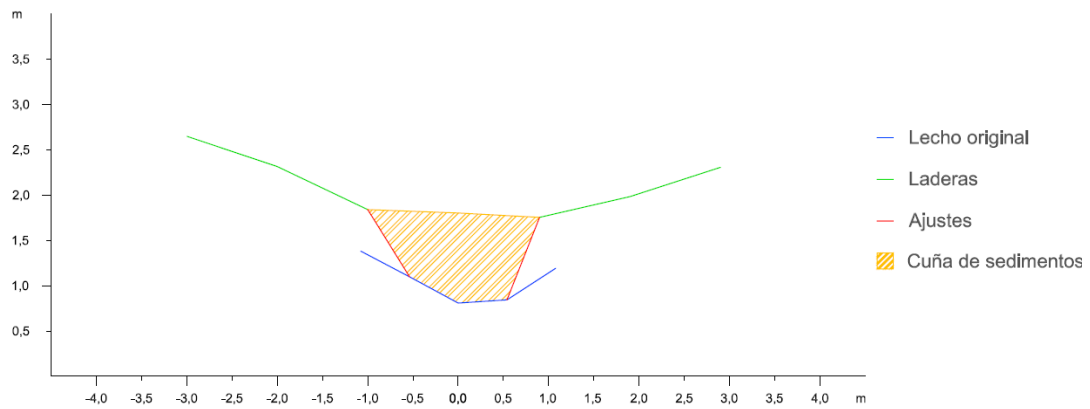


Figura A2.510. Sección transversal 2 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123

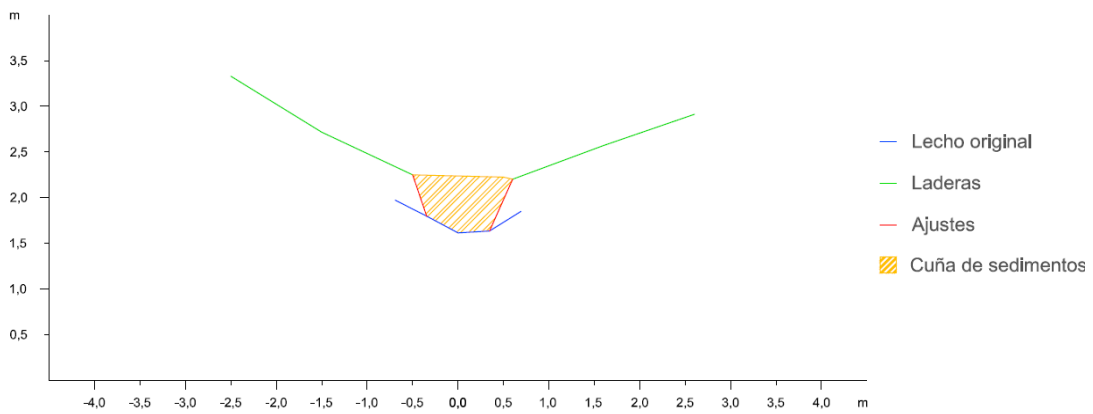


Figura A2.511. Sección transversal 3 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123

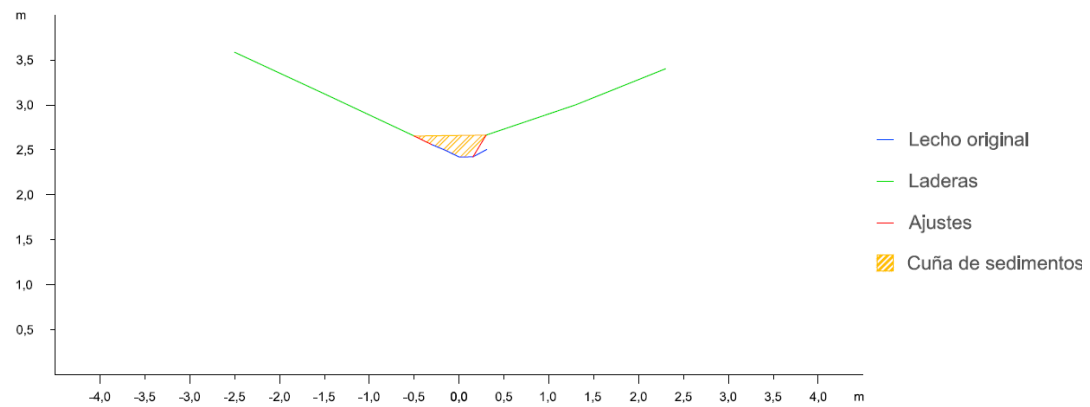


Figura A2.512. Sección transversal 4 de la cuña de sedimentos retenida por el dique 123



A2.2. DATOS Y RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA B

A continuación se exponen los datos y el resultado obtenido de la aplicación de la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007) (denominada en este trabajo metodología B) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Tabla A2.114).

Tabla A2.114. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Castillo *et al.* (2007) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración (1/3)

Dique	S (m ²)	w _s (m)	w _b (m)	w (m)	h (m)	l _s (m)	V (m ³)
1	13,81	1,24	0,00	0,62	0,82	11,10	2,83
2	11,14	1,31	0,00	0,66	0,45	8,50	1,26
3	8,84	1,30	0,00	0,66	0,91	6,80	2,01
4	57,42	3,59	0,00	1,79	3,07	16,00	44,09
5	68,80	5,73	0,00	2,87	2,06	12,00	35,43
6	30,08	4,70	0,00	2,35	1,52	6,40	11,45
7	14,00	2,80	0,00	1,40	1,14	5,00	3,98
8	12,67	1,33	0,00	0,67	0,90	9,50	2,86
9	7,88	1,31	0,00	0,66	1,04	6,00	2,05
10	11,59	1,90	0,00	0,95	0,43	6,10	1,24
11	13,55	2,10	0,00	1,05	1,86	6,45	6,30
12	6,38	2,13	0,00	1,06	1,24	3,00	1,97
13	30,48	2,40	0,00	1,20	1,09	12,70	8,31
14	54,25	5,27	0,00	2,63	2,46	10,30	33,33
15	46,92	5,10	0,00	2,55	2,51	9,20	29,40
16	27,09	2,36	0,00	1,18	2,51	11,50	17,03
17	26,92	3,59	0,00	1,79	3,53	7,50	23,75
18	8,93	1,42	0,00	0,71	1,90	6,30	4,23
19	43,75	3,50	0,00	1,75	1,71	12,50	18,74
20	30,67	3,07	0,00	1,53	1,33	10,00	10,20
21	16,40	1,23	0,00	0,62	0,58	13,30	2,39
22	12,90	1,43	0,00	0,72	0,76	9,00	2,44
23	24,83	1,87	0,00	0,93	0,55	13,30	3,43
24	26,60	2,80	0,00	1,40	0,81	9,50	5,41
25	423,36	14,40	0,00	7,20	4,11	29,40	435,21
27	109,88	9,23	0,00	4,62	4,57	11,90	125,45
28	108,68	8,67	0,00	4,33	1,49	12,54	40,51
29	21,98	5,23	0,00	2,62	2,05	4,20	11,25
30	80,12	6,97	0,00	3,48	2,39	11,50	47,77
32	308,58	11,51	0,00	5,76	2,20	26,80	169,72
33	31,28	6,95	0,00	3,48	3,30	4,50	25,81
34	15,66	4,23	0,00	2,12	2,42	3,70	9,48
35	13,50	2,25	0,00	1,13	2,22	6,00	7,50

Tabla A2.114. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Castillo *et al.* (2007) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración (continuación, 2/3)

Dique	S (m ²)	w_s (m)	w_b (m)	w (m)	h (m)	l_s (m)	V (m ³)
36	26,77	2,66	0,00	1,33	1,84	10,10	12,32
37	21,93	2,33	0,00	1,17	0,96	9,40	5,25
38	3,07	1,05	0,00	0,53	0,82	2,92	0,63
39	122,20	13,00	0,00	6,50	1,80	9,40	54,96
40	12,02	2,36	0,00	1,18	2,50	5,10	7,51
41	45,60	6,33	0,00	3,17	1,73	7,20	19,77
42	5,75	1,97	0,00	0,98	0,99	2,92	1,41
43	23,28	2,12	0,00	1,06	1,30	11,00	7,57
44	35,24	3,23	0,00	1,62	1,53	10,90	13,45
45	48,15	7,77	0,00	3,88	4,33	6,20	52,10
46	17,50	3,50	0,00	1,75	1,46	5,00	6,37
47	40,31	6,95	0,00	3,48	3,21	5,80	32,33
48	15,63	2,33	0,00	1,17	2,10	6,70	8,20
49	15,92	4,98	0,00	2,49	4,56	3,20	18,16
50	12,75	4,25	0,00	2,13	1,39	3,00	4,44
51	43,40	7,00	0,00	3,50	1,30	6,20	14,05
52	69,23	10,33	0,00	5,17	1,55	6,70	26,86
54	12,85	3,21	0,00	1,61	0,75	4,00	2,40
55	59,21	2,73	0,00	1,36	1,81	21,70	26,82
56	20,41	3,93	0,00	1,96	1,19	5,20	6,09
57	66,80	6,27	0,00	3,13	2,24	10,50	36,82
59	11,20	3,86	0,00	1,93	0,50	2,90	1,39
61	21,79	2,87	0,00	1,43	1,29	7,60	7,00
62	207,09	6,68	0,00	3,34	3,50	31,00	181,20
63	160,20	5,71	0,00	2,85	3,00	28,08	120,15
64	12,02	0,67	0,00	0,34	0,70	17,90	2,12
66	12,06	1,57	0,00	0,78	0,39	7,70	1,17
66	26,91	2,30	0,00	1,15	0,53	11,70	3,54
67	5,83	1,67	0,00	0,83	1,02	3,50	1,48
68	24,96	3,20	0,00	1,60	1,29	7,80	8,05
69	39,60	3,67	0,00	1,83	1,91	10,80	18,92
70	12,06	2,28	0,00	1,14	1,49	5,30	4,48
71	18,27	2,90	0,00	1,45	1,43	6,30	6,53
72	29,36	5,15	0,00	2,58	1,80	5,70	13,23
74	19,95	3,33	0,00	1,66	0,66	6,00	3,28
75	19,72	3,40	0,00	1,70	1,25	5,80	6,17
76	19,50	4,33	0,00	2,17	0,68	4,50	3,32
78	17,92	2,13	0,00	1,07	1,61	8,40	7,22
79	18,48	5,13	0,00	2,57	3,17	3,60	14,62
80	9,53	2,22	0,00	1,11	1,62	4,30	3,86



Tabla A2.114. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Castillo *et al.* (2007) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración (continuación, 3/3)

Dique	S (m ²)	w_s (m)	w_b (m)	w (m)	h (m)	l_s (m)	V (m ³)
81	5,40	2,25	0,00	1,13	1,48	2,40	2,00
82	4,56	1,90	0,00	0,95	2,18	2,40	2,49
83	6,91	2,03	0,00	1,02	1,53	3,40	2,64
84	3,07	1,53	0,00	0,77	2,24	2,00	1,71
85	7,19	2,88	0,00	1,44	1,67	2,50	2,99
87	54,98	9,16	0,00	4,58	2,19	6,00	30,15
88	21,32	3,68	0,00	1,84	3,48	5,80	18,57
89	11,95	2,03	0,00	1,01	1,61	5,90	4,81
90	13,76	3,20	0,00	1,60	3,91	4,30	13,45
91	2,60	2,00	0,00	1,00	1,39	1,30	0,90
92	30,75	4,10	0,00	2,05	3,90	7,50	29,94
93	21,00	3,93	0,00	1,96	2,25	5,35	11,83
94	11,06	5,03	0,00	2,51	2,38	2,20	6,57
95	35,29	5,27	0,00	2,63	3,23	6,70	28,48
96	13,48	1,93	0,00	0,96	2,45	7,00	8,25
97	51,33	4,67	0,00	2,33	1,11	11,00	14,19
98	104,86	4,90	0,00	2,45	3,56	21,40	93,33
99	64,13	4,33	0,00	2,17	2,50	14,80	40,04
100	32,48	5,07	0,00	2,53	4,04	6,41	32,79
102	360,82	8,53	0,00	4,27	4,17	42,30	376,15
103	735,54	10,66	0,00	5,33	6,41	69,00	1179,25
104	124,00	10,33	0,00	5,17	2,54	12,00	78,77
105	38,45	2,28	0,00	1,14	4,18	16,90	40,16
106	47,67	4,33	0,00	2,17	2,19	11,00	26,11
107	71,40	6,00	0,00	3,00	4,09	11,90	72,94
108	12,75	2,13	0,00	1,06	2,25	6,00	7,18
109	32,00	2,67	0,00	1,33	1,00	12,00	8,00
110	115,20	9,00	0,00	4,50	3,02	12,80	86,98
111	41,08	5,23	0,00	2,62	2,19	7,85	22,52
112	44,80	4,00	0,00	2,00	2,57	11,20	28,83
113	32,12	2,09	0,00	1,04	2,36	15,40	18,98
114	71,06	4,61	0,00	2,31	4,46	15,40	79,23
116	12,18	2,10	0,00	1,05	2,56	5,80	7,80
117	82,13	6,37	0,00	3,18	2,08	12,90	42,73
118	18,55	1,73	0,00	0,87	1,55	10,70	7,18
119	43,16	4,03	0,00	2,02	2,00	10,70	21,58
120	17,10	2,85	0,00	1,43	2,36	6,00	10,09
121	38,40	4,80	0,00	2,40	2,45	8,00	23,50
122	48,67	4,97	0,00	2,48	2,43	9,80	29,51
123	26,60	2,33	0,00	1,17	1,43	11,40	9,54



A2.2. DATOS Y RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA C

A continuación se exponen los datos y el resultado obtenido de la aplicación de la metodología propuesta por Romero *et al.* (2007a) (denominada en este trabajo metodología C) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Tabla A2.115).

Tabla A2.115. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Romero *et al.* (2007a) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración (1/3)

Dique	w_s (m)	w_b (m)	w (m)	h (m)	B (m ²)	H (m)	V (m ³)
1	3,00	0,00	1,50	0,82	1,23	11,10	4,55
2	4,00	0,00	2,00	0,45	0,90	8,50	2,56
3	2,50	0,00	1,25	0,91	1,14	6,80	2,57
4	6,70	0,00	3,35	3,07	10,29	16,00	54,87
5	7,50	0,00	3,75	2,06	7,73	12,00	30,90
6	6,60	0,00	3,30	1,52	5,02	6,40	10,71
7	3,00	0,00	1,50	1,14	1,70	5,00	2,84
8	1,80	0,00	0,90	0,90	0,81	9,50	2,57
9	2,50	0,00	1,25	1,04	1,30	6,00	2,61
10	3,00	0,00	1,50	0,43	0,64	6,10	1,31
11	4,00	0,00	2,00	1,86	3,72	6,45	8,00
12	3,40	0,00	1,70	1,24	2,10	3,00	2,10
13	3,60	0,00	1,80	1,09	1,96	12,70	8,31
14	4,10	0,00	2,05	2,46	5,04	10,30	17,30
15	7,00	0,00	3,50	2,51	8,77	9,20	26,90
16	6,20	0,00	3,10	2,51	7,79	11,50	29,87
17	6,70	0,00	3,35	3,53	11,83	7,50	29,56
18	1,60	0,00	0,80	1,90	1,52	6,30	3,19
19	5,20	0,76	2,98	1,71	5,10	12,50	21,26
20	4,50	0,00	2,25	1,33	2,99	10,00	9,98
21	1,90	0,00	0,95	0,58	0,55	13,30	2,45
22	2,00	0,00	1,00	0,76	0,76	9,00	2,27
23	2,20	1,25	1,72	0,55	0,95	13,30	4,22
24	3,50	0,00	1,75	0,81	1,42	9,50	4,51
25	22,60	0,00	11,30	4,11	46,47	29,40	455,36
27	20,00	0,00	10,00	4,57	45,67	11,90	181,16
28	6,30	0,00	3,15	1,49	4,70	12,54	19,63
29	10,00	0,00	5,00	2,05	10,24	4,20	14,33
30	12,00	0,00	6,00	2,39	14,31	11,50	54,86
32	25,60	0,00	12,80	2,20	28,16	26,80	251,56
33	11,00	0,00	5,50	3,30	18,16	4,50	27,23
34	3,70	0,00	1,85	2,42	4,48	3,70	5,52
35	3,40	0,00	1,70	2,22	3,78	6,00	7,55

Tabla A2.115. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Romero *et al.* (2007a) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración (continuación, 2/3)

Dique	w_s (m)	w_b (m)	w (m)	h (m)	B (m ²)	H (m)	V (m ³)
36	4,66	0,00	2,33	1,84	4,28	10,10	14,41
37	4,70	0,00	2,35	0,96	2,25	9,40	7,05
38	2,70	0,00	1,35	0,82	1,10	2,92	1,07
39	14,00	0,00	7,00	1,80	12,59	9,40	39,46
40	6,00	0,00	3,00	2,50	7,50	5,10	12,75
41	10,00	0,00	5,00	1,73	8,67	7,20	20,81
42	3,47	0,00	1,74	0,99	1,71	2,92	1,66
43	4,00	0,00	2,00	1,30	2,60	11,00	9,53
44	4,40	0,00	2,20	1,53	3,36	10,90	12,21
45	9,80	0,00	4,90	4,33	21,21	6,20	43,83
46	13,00	0,00	6,50	1,46	9,46	5,00	15,77
47	11,00	0,00	5,50	3,21	17,64	5,80	34,11
48	3,00	0,00	1,50	2,10	3,15	6,70	7,02
49	10,00	0,00	5,00	4,56	22,82	3,20	24,34
50	8,00	0,00	4,00	1,39	5,57	3,00	5,57
51	8,00	0,00	4,00	1,30	5,18	6,20	10,71
52	12,90	0,00	6,45	1,55	10,01	6,70	22,36
54	6,00	0,00	3,00	0,75	2,24	4,00	2,98
55	8,50	0,00	4,25	1,81	7,70	21,70	55,70
56	6,00	0,00	3,00	1,19	3,58	5,20	6,21
57	10,60	0,00	5,30	2,24	11,86	10,50	41,51
59	4,45	0,00	2,23	0,50	1,11	2,90	1,07
61	4,40	0,00	2,20	1,29	2,83	7,60	7,17
62	12,00	0,00	6,00	3,50	21,00	31,00	217,00
63	9,80	0,00	4,90	3,00	14,70	28,08	137,59
64	1,30	0,00	0,66	0,70	0,46	17,90	2,73
66	2,40	0,00	1,20	0,39	0,47	7,70	1,20
66	2,90	0,00	1,45	0,53	0,76	11,70	2,97
67	2,30	0,00	1,15	1,02	1,17	3,50	1,36
68	3,30	0,00	1,66	1,29	2,13	7,80	5,53
69	4,00	0,00	2,00	1,91	3,82	10,80	13,76
70	4,60	0,00	2,30	1,49	3,42	5,30	6,03
71	4,00	0,00	2,00	1,43	2,86	6,30	6,00
72	8,40	0,00	4,20	1,80	7,57	5,70	14,39
74	8,80	0,00	4,40	0,66	2,90	6,00	5,79
75	5,60	0,00	2,80	1,25	3,51	5,80	6,78
76	5,50	0,00	2,75	0,68	1,88	4,50	2,81
78	2,50	0,00	1,25	1,61	2,02	8,40	5,64
79	7,40	0,00	3,70	3,17	11,71	3,60	14,05
80	2,70	0,00	1,35	1,62	2,18	4,30	3,13

Tabla A2.115. Datos y resultado de la aplicación de la metodología de Romero *et al.* (2007a) para el cálculo del volumen de sedimentos retenido por los diques de la restauración (continuación, 3/3)

Dique	w_s (m)	w_b (m)	w (m)	h (m)	B (m ²)	H (m)	V (m ³)
81	3,00	0,00	1,50	1,48	2,23	2,40	1,78
82	3,80	0,00	1,90	2,18	4,15	2,40	3,32
83	3,00	0,00	1,50	1,53	2,30	3,40	2,60
84	3,00	0,00	1,50	2,24	3,35	2,00	2,24
85	8,00	0,00	4,00	1,67	6,66	2,50	5,55
87	11,25	0,00	5,63	2,19	12,34	6,00	24,68
88	7,40	0,00	3,70	3,48	12,89	5,80	24,92
89	3,90	0,00	1,95	1,61	3,14	5,90	6,18
90	3,90	0,00	1,95	3,91	7,62	4,30	10,93
91	4,00	0,00	2,00	1,39	2,77	1,30	1,20
92	6,30	0,00	3,15	3,90	12,27	7,50	30,67
93	8,60	0,00	4,30	2,25	9,69	5,35	17,28
94	9,90	0,00	4,95	2,38	11,77	2,20	8,63
95	7,20	0,00	3,60	3,23	11,62	6,70	25,95
96	3,00	0,00	1,50	2,45	3,68	7,00	8,58
97	6,00	0,00	3,00	1,11	3,32	11,00	12,17
98	9,00	0,00	4,50	3,56	16,02	21,40	114,28
99	3,00	0,00	1,50	2,50	3,75	14,80	18,48
100	6,00	0,00	3,00	4,04	12,11	6,41	25,88
102	4,00	0,00	2,00	4,17	8,34	42,30	117,59
103	22,90	0,00	11,45	6,41	73,43	69,00	1688,86
104	11,00	0,00	5,50	2,54	13,98	12,00	55,90
105	5,00	0,00	2,50	4,18	10,45	16,90	58,84
106	6,00	0,00	3,00	2,19	6,57	11,00	24,10
107	10,00	0,00	5,00	4,09	20,43	11,90	81,04
108	2,50	0,00	1,25	2,25	2,81	6,00	5,63
109	4,00	0,00	2,00	1,00	2,00	12,00	8,00
110	9,00	0,00	4,50	3,02	13,59	12,80	57,98
111	5,90	0,00	2,95	2,19	6,47	7,85	16,93
112	7,00	0,00	3,50	2,57	9,01	11,20	33,63
113	4,00	0,00	2,00	2,36	4,73	15,40	24,27
114	8,50	0,00	4,25	4,46	18,96	15,40	97,30
116	5,30	0,00	2,66	2,56	6,79	5,80	13,13
117	7,00	0,00	3,50	2,08	7,28	12,90	31,32
118	2,70	0,00	1,35	1,55	2,09	10,70	7,45
119	6,50	0,00	3,25	2,00	6,50	10,70	23,18
120	5,70	0,00	2,85	2,36	6,73	6,00	13,45
121	4,90	0,00	2,45	2,45	6,00	8,00	15,99
122	5,20	0,00	2,60	2,43	6,31	9,80	20,60
123	4,00	0,00	2,00	1,43	2,87	11,40	10,90

ANEXO III:

Estadística ampliada: normalidad de los datos

En este anexo se expone el análisis normalidad de las variables transformadas a su función logarítmica y el estudio estadístico de comparación de las muestras empleando las variables transformadas. Únicamente se incluyen las variables que no cumplen normalidad. Los cálculos, los gráficos de resultados y las tablas que se exponen en este anexo proceden del programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.

A3.1. ANÁLISIS DE NORMALIDAD

A3.1.1. VOLUMEN DE SEDIMENTOS

A) Volumen de sedimentos obtenido por aplicación de la metodología A: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } V_A$

113 valores con rango desde 0,0195 a 3,2308

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } V_A$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.1.

Tabla A3.1. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } V_A$

Normal
media = 1,16184
desviación estándar = 0,580224

La Figura A3.1 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } V_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } V_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.2).

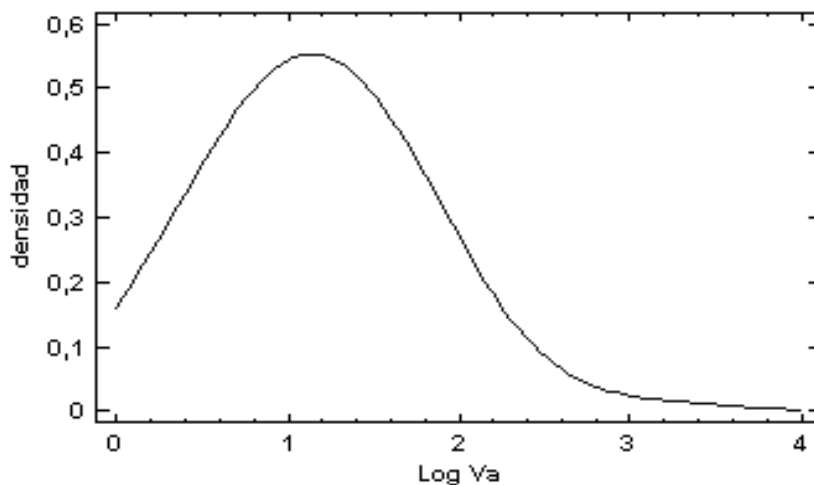


Figura A3.1. Traza de densidad para $\text{Log } V_A$



Tabla A3.2. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } V_A$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,973661	0,205229

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } V_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.2), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.3) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.3). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } V_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

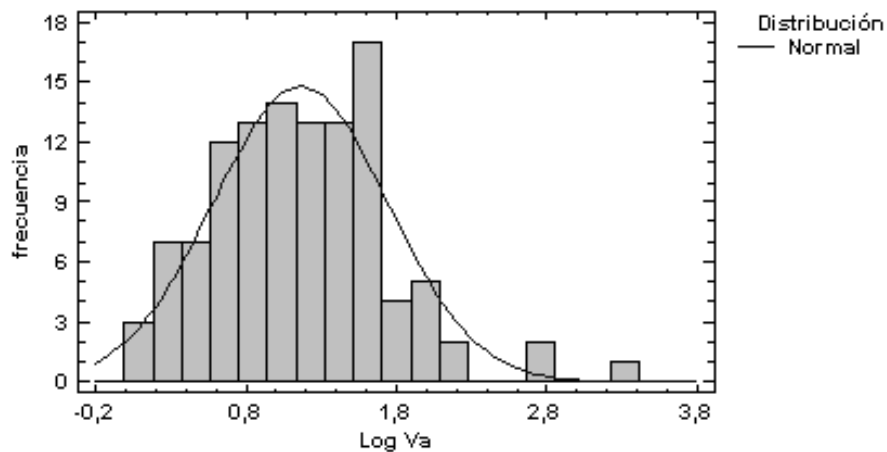


Figura A3.2. Histograma para $\text{Log } V_A$

Tabla A3.3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } V_A$

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0515103
DMENOS	0,025954
DN	0,0515103
Valor-P	0,925245

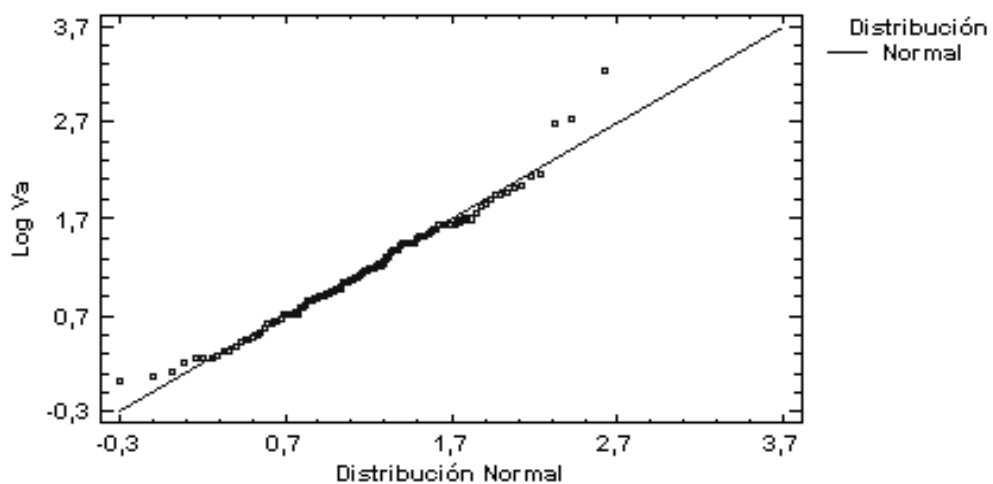


Figura A3.3. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } V_A$

B) Volumen de sedimentos obtenido por aplicación de la metodología B: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } V_B$

113 valores con rango desde -0,2033 a 3,0716

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } V_B$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.4.

Tabla A3.4. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } V_B$

<i>Normal</i>
media = 1,06338
desviación estándar = 0,605487

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } V_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal (Figura A3.4). De acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla A3.5) y debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } V_B$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

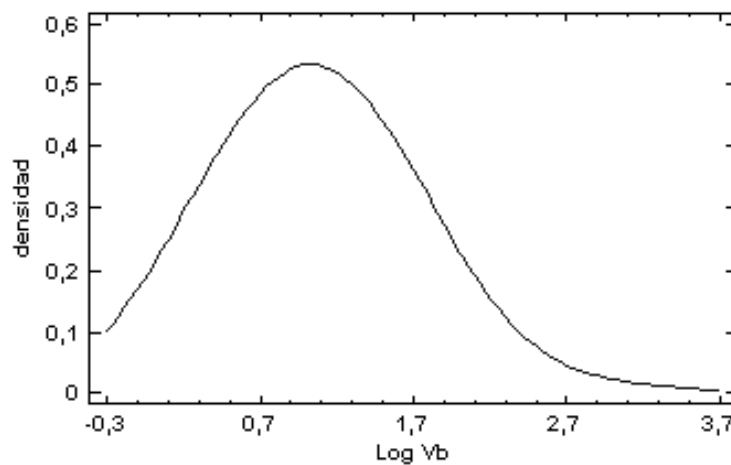


Figura A3.4. Traza de densidad para $\text{Log } V_B$

Tabla A3.5. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } V_B$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97856	0,414602

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } V_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.5), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.6) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.6).

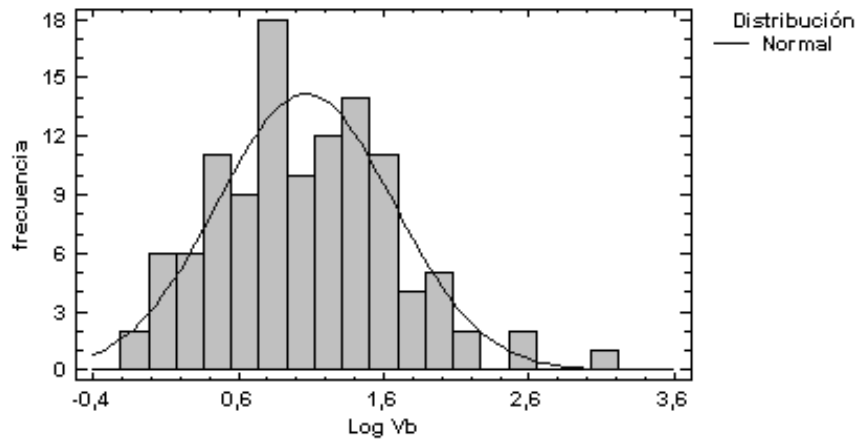


Figura A3.5. Histograma para $\text{Log } V_B$

Tabla A3.6. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } V_B$

DMAS	0,053901
DMENOS	0,0326351
DN	0,053901
Valor-P	0,897919

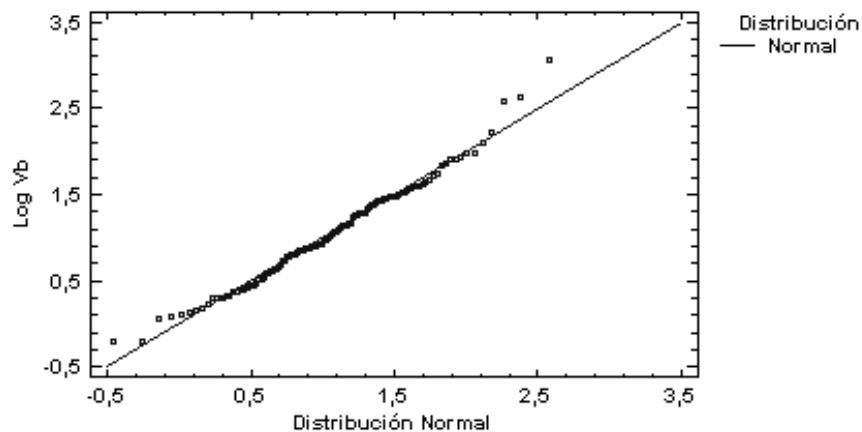


Figura A3.6. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } V_B$

C) Volumen de sedimentos obtenido por aplicación de la metodología C: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } V_C$

113 valores con rango desde 0,029 a 3,2276

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } V_C$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.7.

Tabla A3.7. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } V_C$

<i>Normal</i>
media = 1,08262
desviación estándar = 0,587445

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } V_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal

(Figura A3.7). De acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla A3.8) y debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } V_C$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

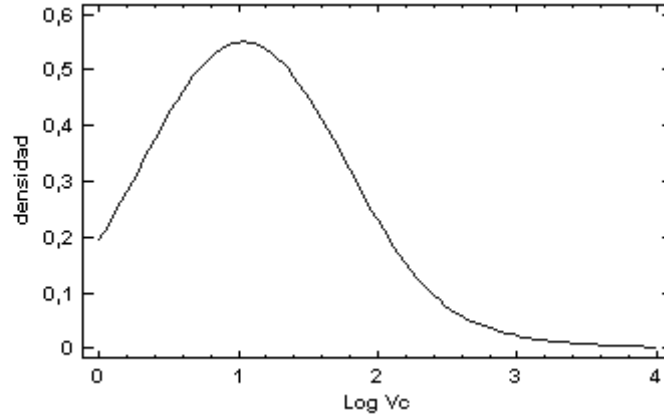


Figura A3.7. Traza de densidad para $\text{Log } V_C$

Tabla A3.8. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } V_C$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,969611	0,101135

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } V_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.8), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.9) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.9).

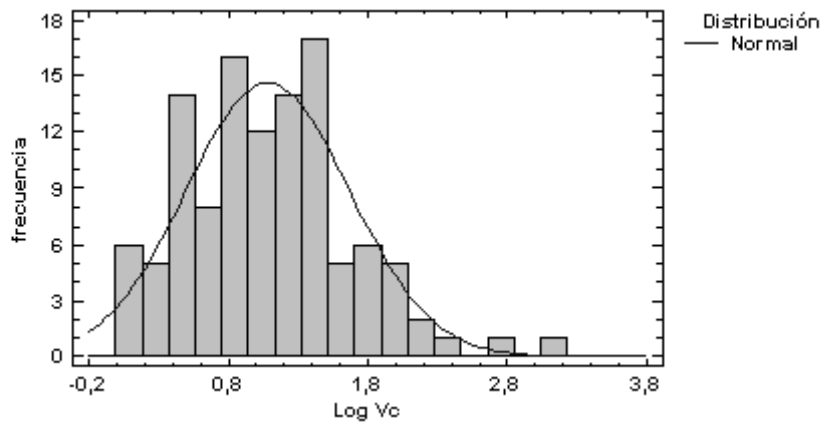


Figura A3.8. Histograma para $\text{Log } V_C$

Tabla A3.9. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } V_C$

DMAS	0,0550762
DMENOS	0,0364412
DN	0,0550762
Valor-P	0,88292

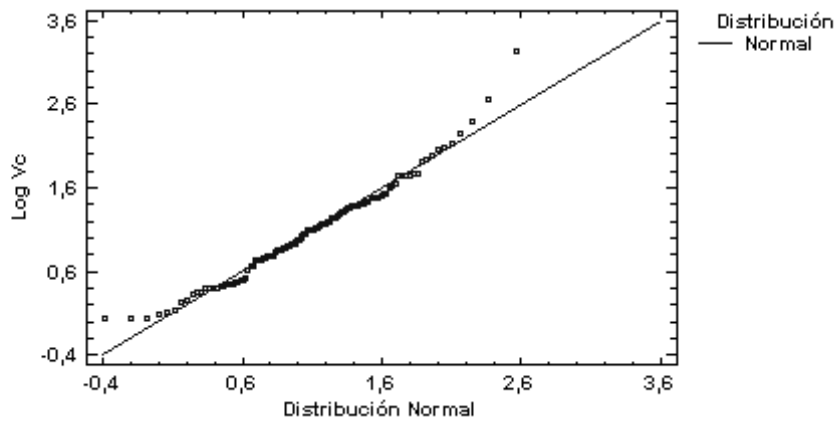


Figura A3.9. Gráfica cuantil-cuantil para $Log V_c$

A3.1.2. MASA DE SEDIMENTOS

A) Masa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología A: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $Log SW_A$

113 valores con rango desde 0,0619 a 3,3456

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $Log SW_A$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.10.

Tabla A3.10. Distribuciones Ajustadas para la variable $Log SW_A$

<i>Normal</i>
media = 1,29048
desviación estándar = 0,594173

La Figura A3.10 muestra la traza de densidad para determinar si $Log SW_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $Log SW_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.11).

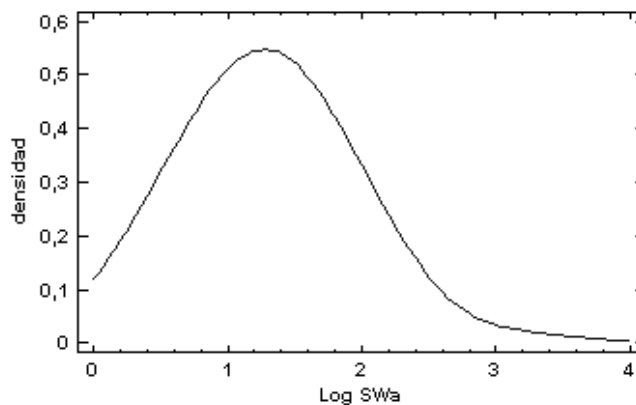


Figura A3.10. Traza de densidad para $Log SW_A$



Tabla A3.11. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SW_A$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,976559	0,318094

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } SW_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.11), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.12) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.12). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SW_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

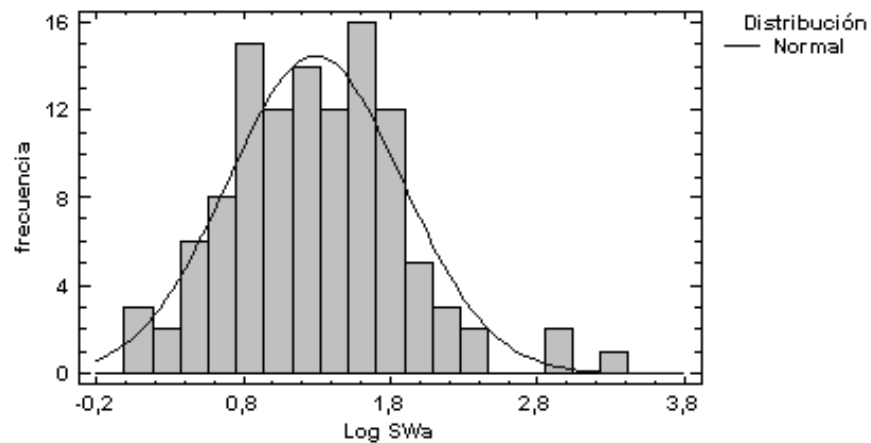


Figura A3.11. Histograma para $\text{Log } SW_A$

Tabla A3.12. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SW_A$

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0457873
DMENOS	0,0316956
DN	0,0457873
Valor-P	0,971806

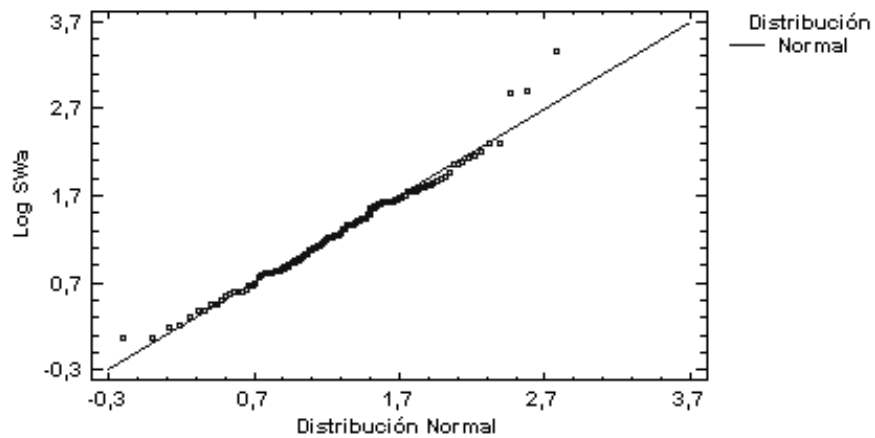


Figura A3.12. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SW_A$



B) Masa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología B: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } SW_B$

113 valores con rango desde -0,1031 a 3,1864

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } SW_B$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.13.

Tabla A3.13. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SW_B$

Normal
media = 1,19202
desviación estándar = 0,616721

La Figura A3.13 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } SW_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SW_B$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.14).

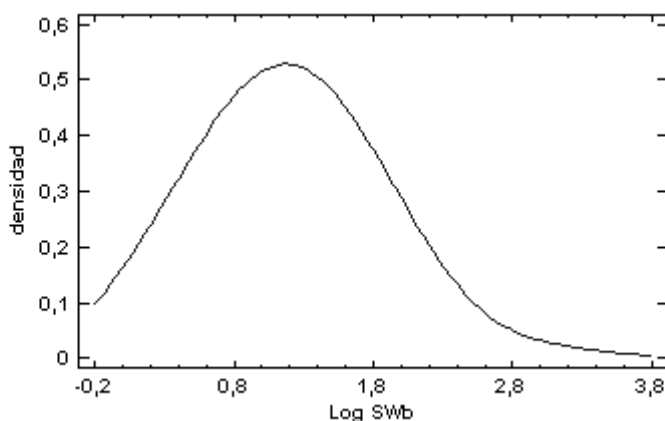


Figura A3.13. Traza de densidad para $\text{Log } SW_B$

Tabla A3.14. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SW_B$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,978005	0,386487

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } SW_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.14), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.15) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.15). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SW_B$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

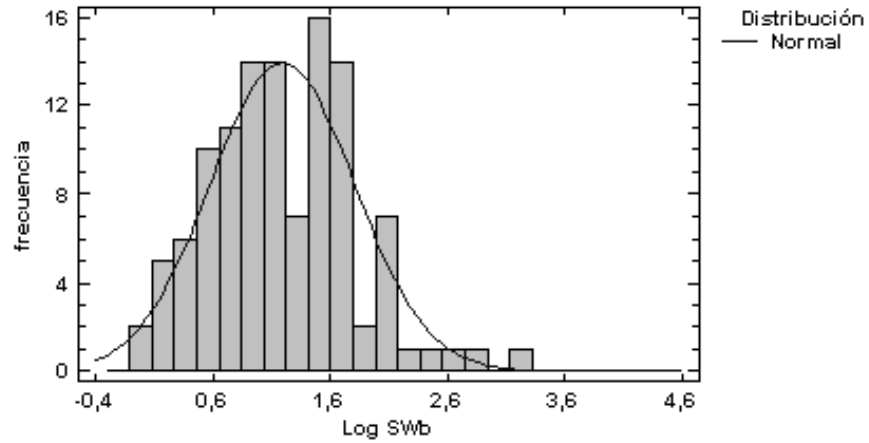


Figura A3.14. Histograma para $\text{Log } SW_B$

Tabla A3.15. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SW_B$

	Normal
DMAS	0,0439302
DMENOS	0,0387825
DN	0,0439302
Valor-P	0,981255

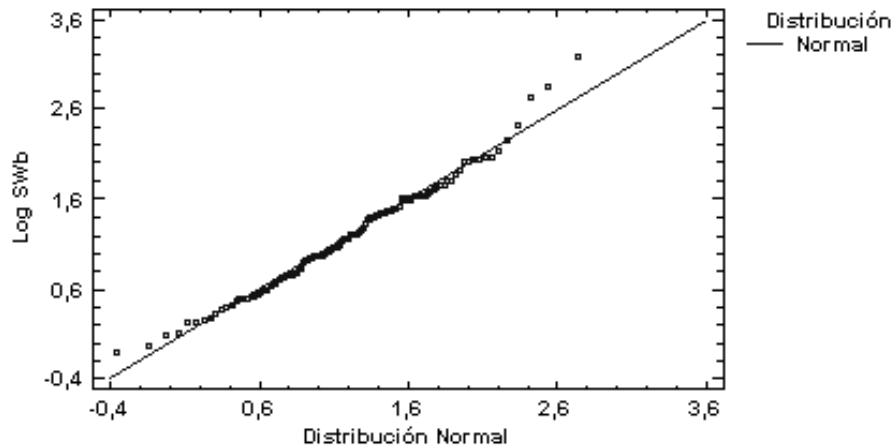


Figura A3.15. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SW_B$

C) Masa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología C: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } SW_C$

113 valores con rango desde 0,1169 a 3,3424

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } SW_C$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.16.

Tabla A3.16. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SW_C$

Normal
media = 1,21126
desviación estándar = 0,599952



La Figura A3.16 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } SW_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SW_C$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.17).

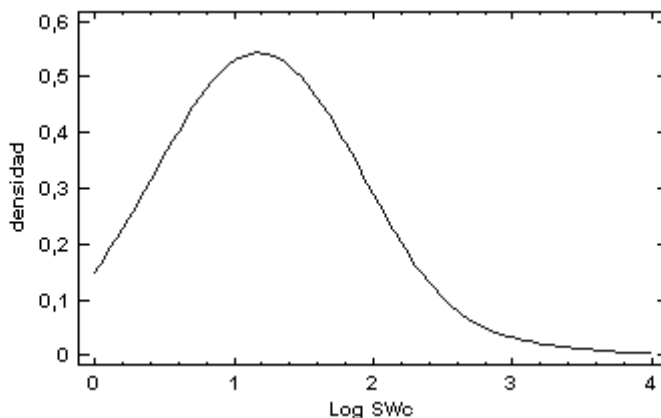


Figura A3.16. Traza de densidad para $\text{Log } SW_C$

Tabla A3.17. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SW_C$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,968907	0,0885197

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } SW_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.17), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.18) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.17). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SW_C$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

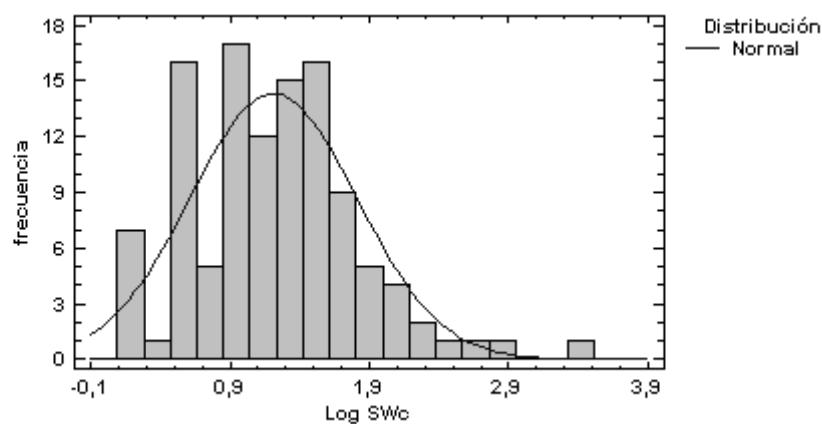


Figura A3.17. Histograma para $\text{Log } SW_C$

Tabla A3.18. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } SW_c$

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0600066
DMENOS	0,0429124
DN	0,0600066
Valor-P	0,810522

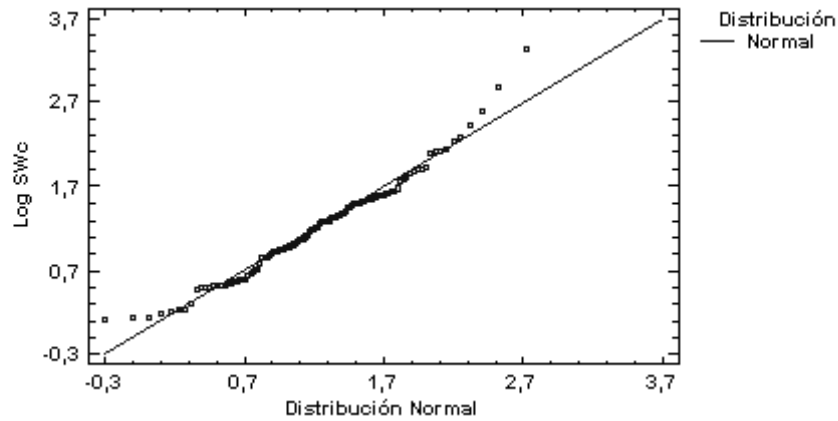


Figura A3.18. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } SW_c$

A3.1.3. TASA DE EROSIÓN

A) Tasa de erosión obtenida por aplicación de la metodología A: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } SY_A$

113 valores con rango desde -1,802 a 1,777

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } SY_A$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.19.

Tabla A3.19. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SY_A$

Normal
media = 0,280539
desviación estándar = 0,735477

La Figura A3.19 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } SY_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SY_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.20).

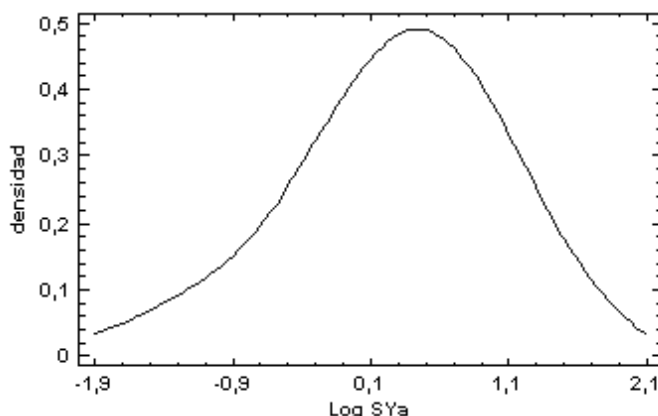


Figura A3.19. Traza de densidad para $Log SY_A$

Tabla A3.20. Pruebas de Normalidad para $Log SY_A$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,96339	0,028503

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $Log SY_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.20), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.21) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.21). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $Log SY_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

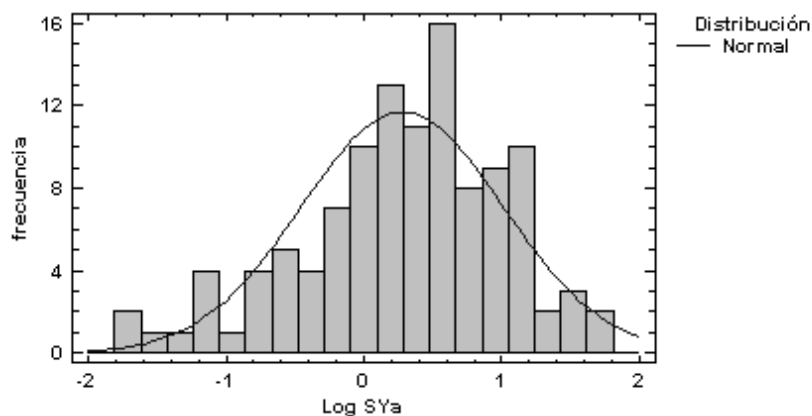


Figura A3.20. Histograma para $Log SY_A$

Tabla A3.21. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $Log SY_A$

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0482888
DMENOS	0,0720432
DN	0,0720432
Valor-P	0,600595

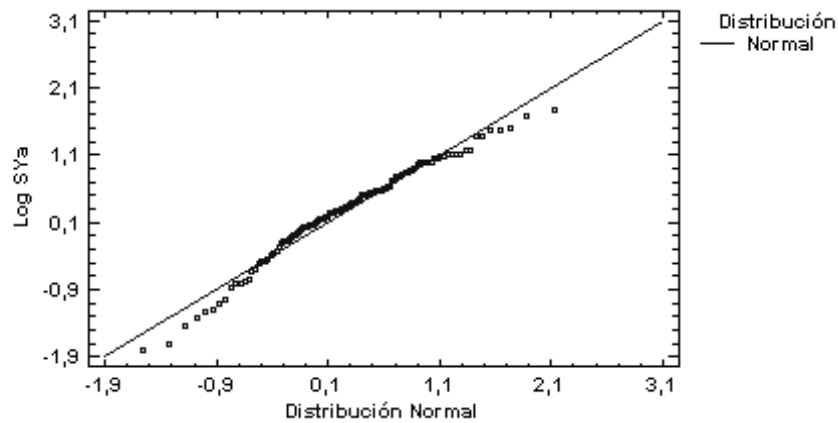


Figura A3.21. Gráfica cuantil-cuantil para $Log SY_A$

B) Tasa de erosión obtenida por aplicación de la metodología B: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $Log SY_B$

113 valores con rango desde -1,824 a 1,8411

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $Log SY_B$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.22.

Tabla A3.22. Distribuciones Ajustadas para la variable $Log SY_B$

Normal
media = 0,182079
desviación estándar = 0,724507

La Figura A3.22 muestra la traza de densidad para determinar si $Log SY_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $Log SY_B$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.23).

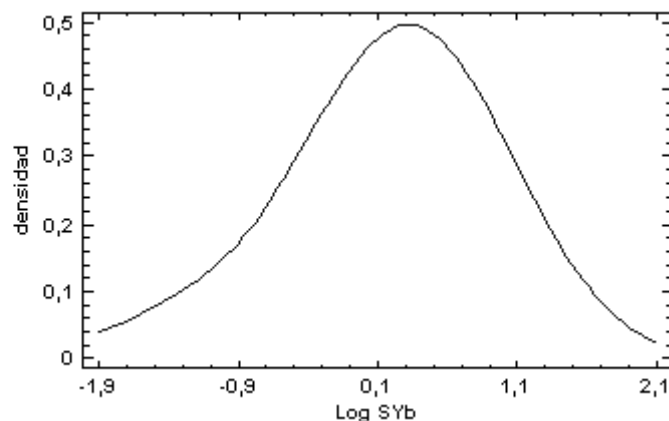


Figura A3.22. Traza de densidad para $Log SY_B$



Tabla A3.23. Pruebas de Normalidad para Log SY_B

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,969879	0,106307

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si Log SY_B puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.23), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.24) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.24). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Log SY_B proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

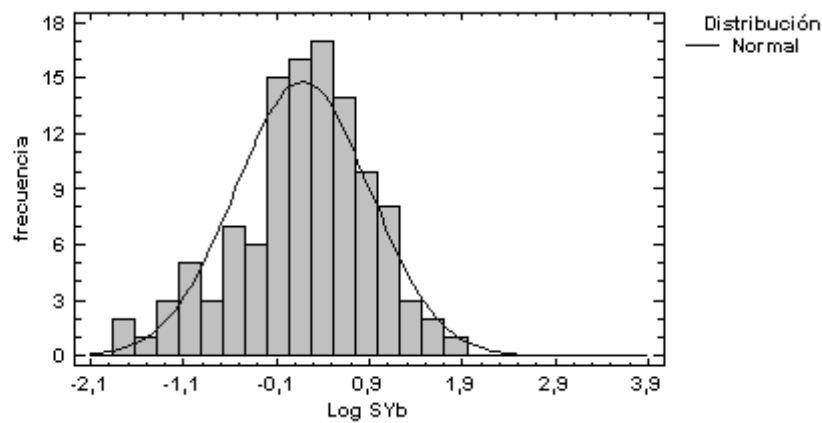


Figura A3.23. Histograma para Log SY_B

Tabla A3.24. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Log SY_B

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0396766
DMENOS	0,0678872
DN	0,0678872
Valor-P	0,674956

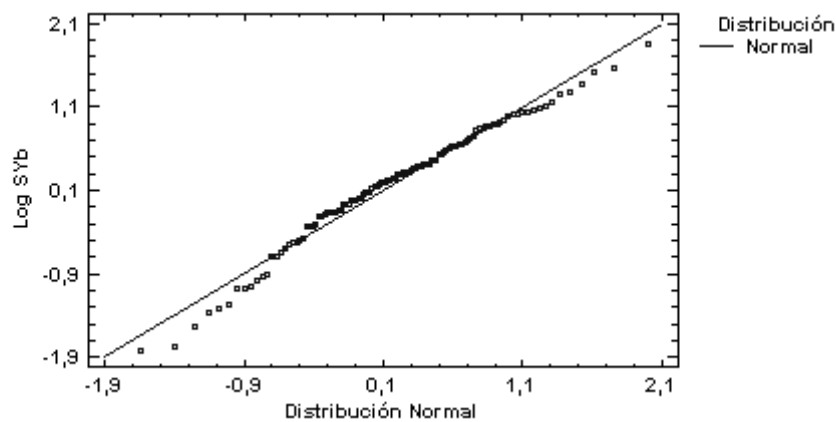


Figura A3.24. Gráfica cuantil-cuantil para Log SY_B

C) Tasa de erosión obtenida por aplicación de la metodología C: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $\text{Log } SY_C$

113 valores con rango desde -1,9386 a 2,0007

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } SY_C$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.25.

Tabla A3.25. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } SY_C$

<i>Normal</i>
media = 0,201318
desviación estándar = 0,718721

La Figura A3.25 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } SY_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SY_C$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.26).

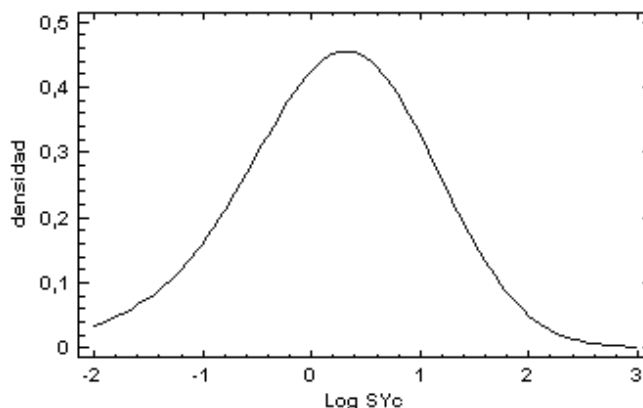


Figura A3.25. Traza de densidad para $\text{Log } SY_C$

Tabla A3.26. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } SY_C$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974874	0,248392

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } SY_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.26), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.27) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.27). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } SY_C$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

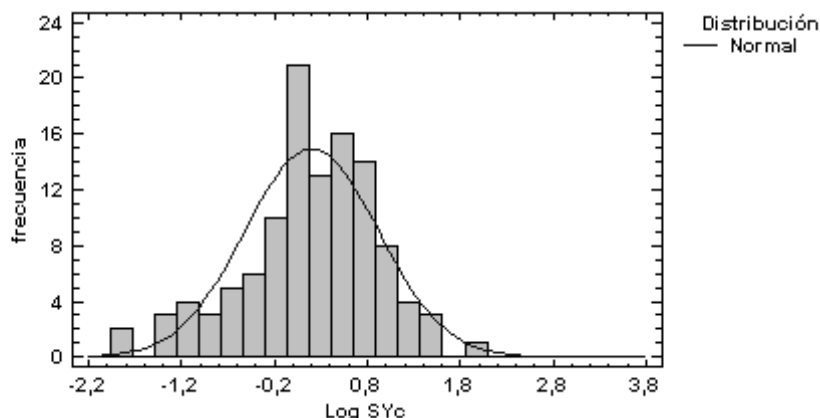


Figura A3.26. Histograma para $Log SY_c$

Tabla A3.27. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $Log SY_c$
Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,040773
DMENOS	0,0887956
DN	0,0887956
Valor-P	0,337427

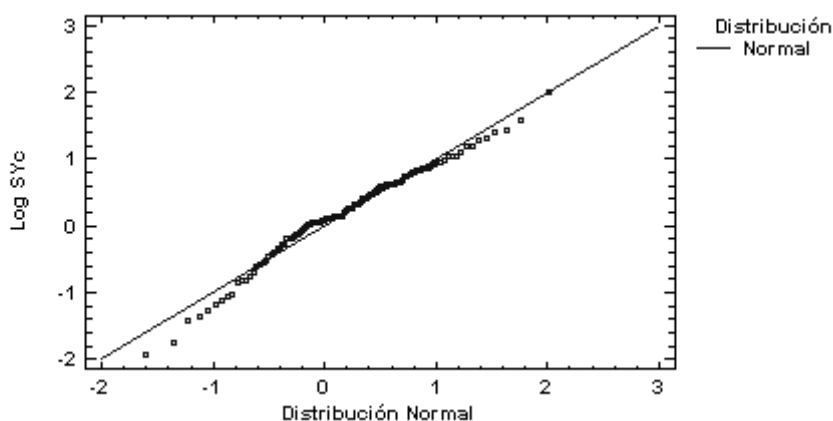


Figura A3.27. Gráfica cuantil-cuantil para $Log SY_c$

A3.1.3. TASA TOTAL DE SEDIMENTOS

A) Tasa total de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología A: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $Log TSY_A$
113 valores con rango desde -1,4881 a 1,7781

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $Log TSY_A$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.28.

Tabla A3.28. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } TSY_A$

<i>Normal</i>
media = 0,327709
desviación estándar = 0,674379

La Figura A3.28 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } TSY_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } TSY_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.29).

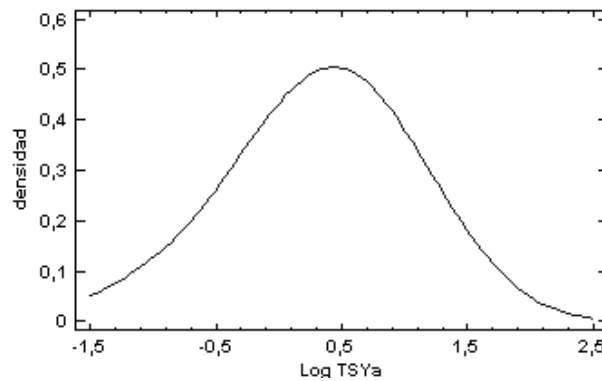


Figura A3.28. Traza de densidad para $\text{Log } TSY_A$

Tabla A3.29. Pruebas de Normalidad para $\text{Log } TSY_A$

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974038	0,218029

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $\text{Log } TSY_A$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.29), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.30) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.30). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } TSY_A$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

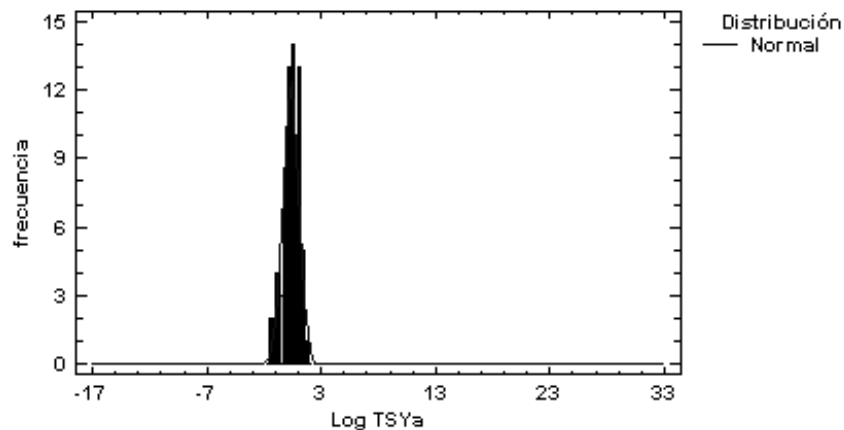
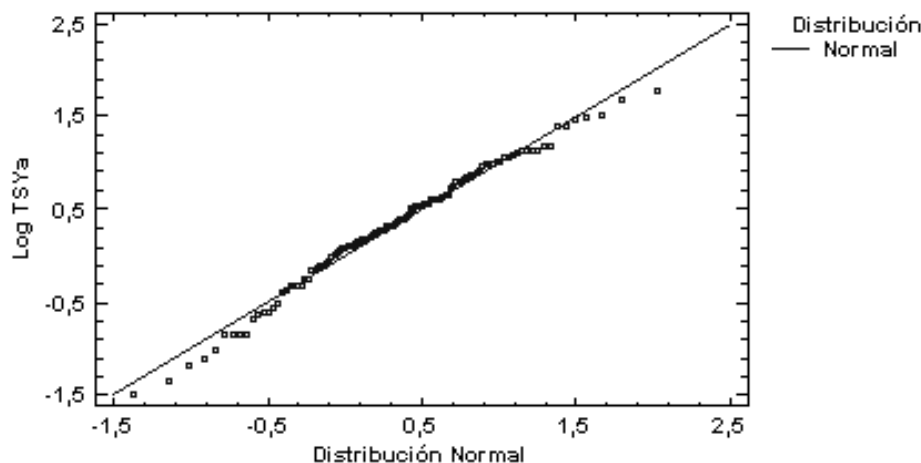


Figura A3.29. Histograma para $\text{Log } TSY_A$

Tabla A3.30. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\text{Log } TSY_A$

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0402457
DMENOS	0,0581977
DN	0,0581977
Valor-P	0,838667

Figura A3.30. Gráfica cuantil-cuantil para $\text{Log } TSY_A$

B) Tasa total de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología B: cambio de variable a su función logarítmica

Datos/Variable: $\text{Log } TSY_B$

113 valores con rango desde -1,2554 a 1,842

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $\text{Log } TSY_B$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.31.

Tabla A3.31. Distribuciones Ajustadas para la variable $\text{Log } TSY_B$

Normal
media = 0,254444
desviación estándar = 0,628595

La Figura A3.31 muestra la traza de densidad para determinar si $\text{Log } TSY_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $\text{Log } TSY_B$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.32).

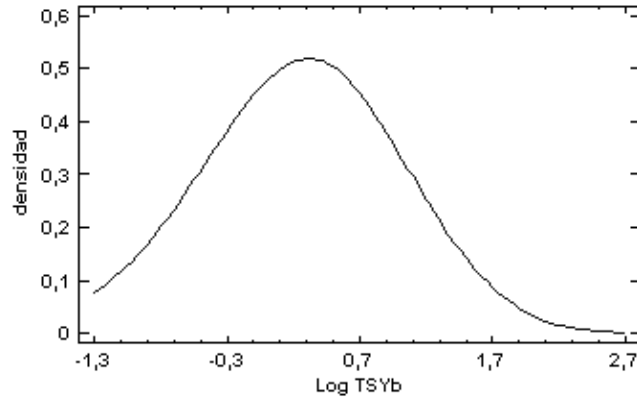


Figura A3.31. Traza de densidad para $Log TSY_B$

Tabla A3.32. Pruebas de Normalidad para $Log TSY_B$

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,982289	0,620115

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si $Log TSY_B$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.32), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.33) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.33). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $Log TSY_B$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

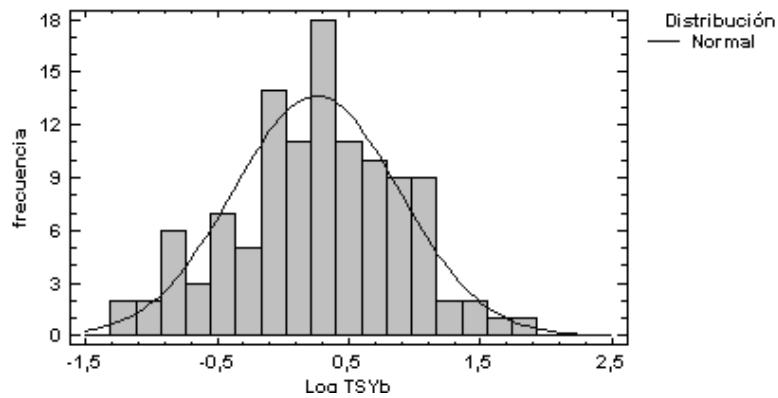


Figura A3.32. Histograma para $Log TSY_B$

Tabla A3.33. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $Log TSY_B$

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0343857
DMENOS	0,0431673
DN	0,0431673
Valor-P	0,984409

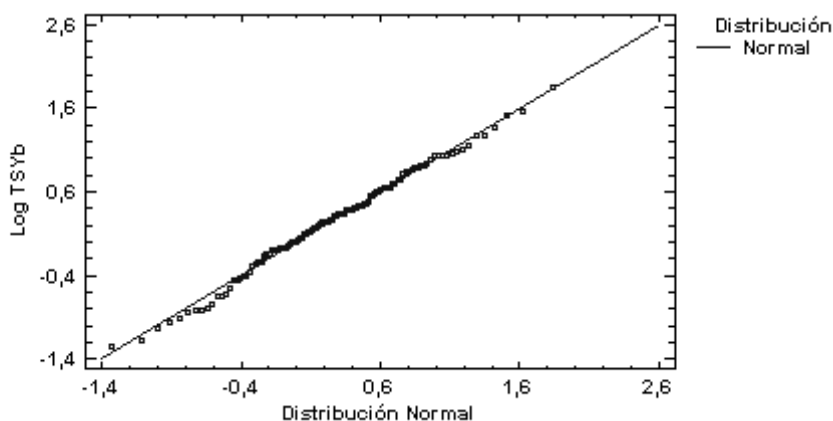


Figura A3.33. Gráfica cuantil-cuantil para $Log TSY_B$

C) Tasa total de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología C: cambio de variable a su función logarítmica

Variable: $Log TSY_C$
 113 valores con rango desde -1,3742 a 2,0013

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de $Log TSY_C$. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran en la Tabla A3.34.

Tabla A3.34. Distribuciones Ajustadas para la variable $Log TSY_C$

<i>Normal</i>
media = 0,268942
desviación estándar = 0,630221

La Figura A3.34 muestra la traza de densidad para determinar si $Log TSY_C$ puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que $Log TSY_C$ proviene de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla A3.35).

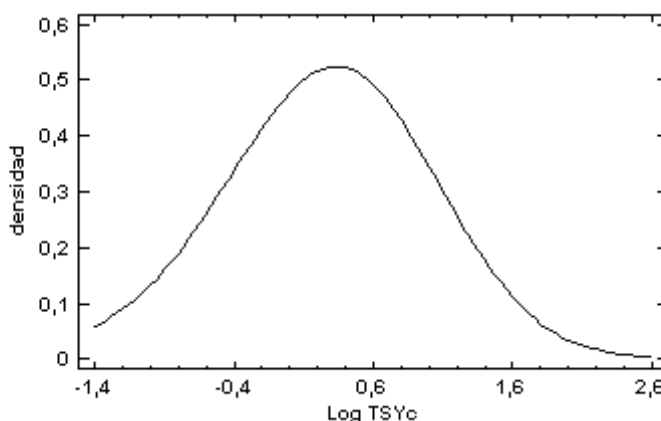


Figura A3.34. Traza de densidad para $Log TSY_C$

Tabla A3.35. Pruebas de Normalidad para Log TSY_c

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,987004	0,858048

A continuación se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si Log TSY_c puede modelarse adecuadamente con una distribución normal: histograma (Figura A3.35), pruebas de bondad de ajuste (Tabla A3.36) y gráfica cuantil-cuantil (Figura A3.36). Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Log TSY_c proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

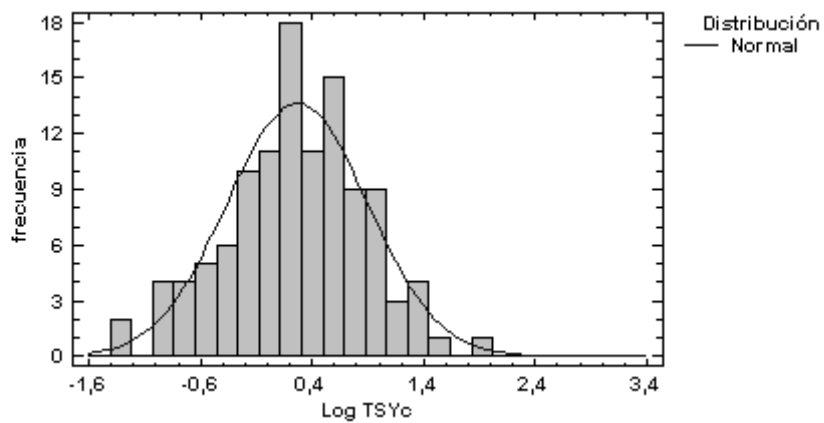


Figura A3.35. Histograma para Log TSY_c

Tabla A3.36. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Log TSY_c

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,0305755
DMENOS	0,0577213
DN	0,0577213
Valor-P	0,845799

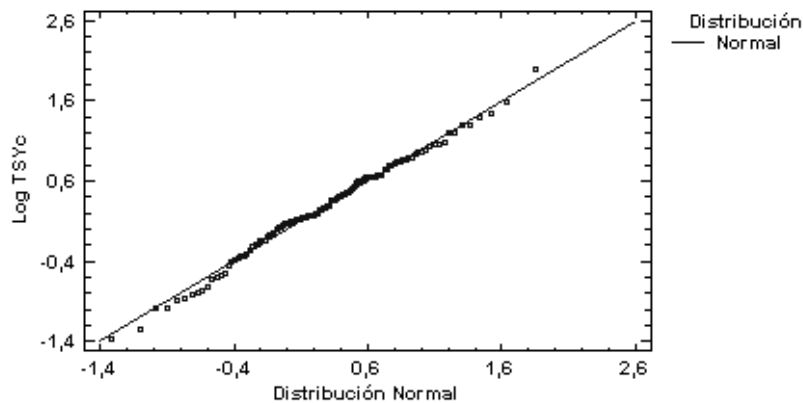


Figura A3.36. Gráfica cuantil-cuantil para Log TSY_c



A3.2. COMPARACIÓN DE MUESTRAS

A3.2.1. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ Y $\text{Log } V_C$

En este apartado se comparan las muestras de $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, para estudiar si existen diferencias significativas entre las muestras. En primer lugar se muestra el gráfico de dispersión de las muestras (Figura A3.37) y el resumen estadístico de cada una (Tabla A3.37).

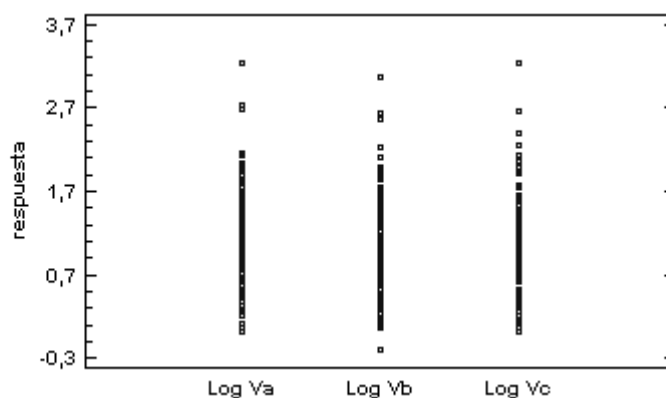


Figura A3.37. Dispersión de las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

Tabla A3.37. Resumen estadístico de las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
$\text{Log } V_A$	113	1,16184	0,580224	49,9401%	0,0195
$\text{Log } V_B$	113	1,06338	0,605487	56,9399%	-0,2033
$\text{Log } V_C$	113	1,08262	0,587445	54,2614%	0,029
Total	339	1,10261	0,590938	53,5944%	-0,2033

	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
$\text{Log } V_A$	3,2308	3,2113	2,19368	1,73897
$\text{Log } V_B$	3,0716	3,2749	1,80145	0,904206
$\text{Log } V_C$	3,2276	3,1986	2,49071	1,83028
Total	3,2308	3,4341	3,61699	2,31446

A continuación se ha realizado el análisis de la varianza (Figura A3.38). La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0,880654, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza (Tabla A3.38).

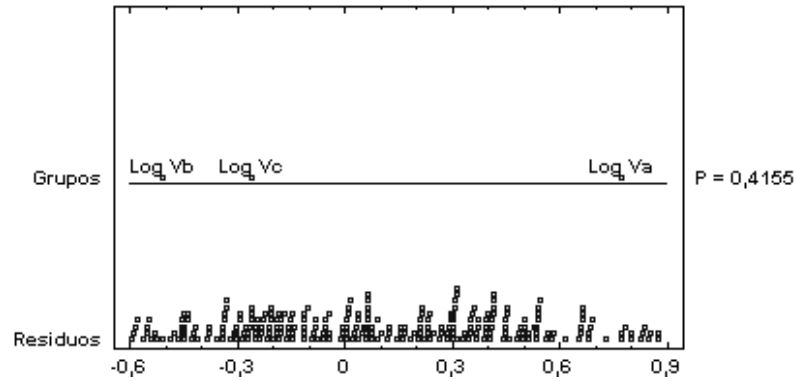


Figura A3.38. Gráfico ANOVA de las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

Tabla A3.38. Tabla ANOVA para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,615498	2	0,307749	0,88	0,4155
Intra grupos	117,417	336	0,349455		
Total (Corr.)	118,032	338			

Los intervalos mostrados en la Figura A3.39 están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. La Tabla A3.39 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La Tabla A3.39 también muestra un intervalo alrededor de cada media. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.

En la Figura A3.40 se muestra el gráfico de caja y bigotes de las muestras.

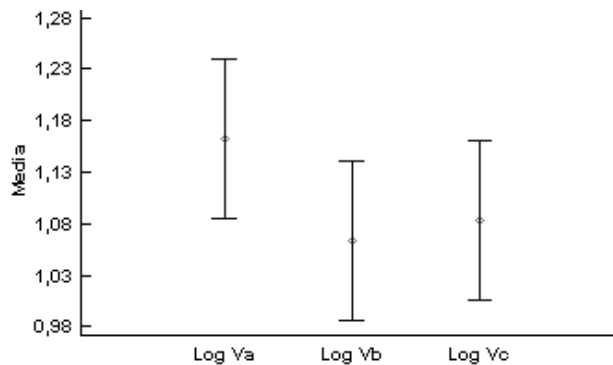


Figura A3.39. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, con intervalos de confianza del 95,0%

Tabla A3.39. Tabla de Medias para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, con intervalos de confianza del 95,0%

	Casos	Media	Error Est.		
			(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
$\text{Log } V_A$	113	1,16184	0,0556104	1,08449	1,23919
$\text{Log } V_B$	113	1,06338	0,0556104	0,986029	1,14073
$\text{Log } V_C$	113	1,08262	0,0556104	1,00527	1,15997
Total	339	1,10261			

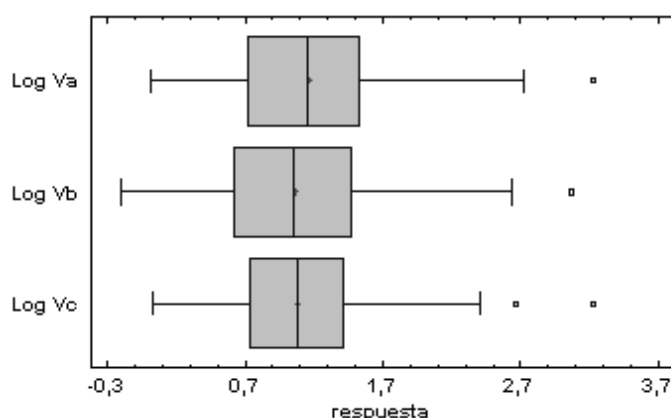


Figura A3.40. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

La Tabla A3.40 muestra la prueba de múltiples rangos. Esta prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la columna derecha se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla A3.40. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$
Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
$\text{Log } V_B$	113	1,06338	X
$\text{Log } V_C$	113	1,08262	X
$\text{Log } V_A$	113	1,16184	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
$\text{Log } V_A - \text{Log } V_B$		0,0984611	0,154699
$\text{Log } V_A - \text{Log } V_C$		0,0792204	0,154699
$\text{Log } V_B - \text{Log } V_C$		-0,0192407	0,154699

* indica una diferencia significativa.

En la Figura A3.41 se observa el gráfico de residuos para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$.

En la Tabla A3.41 se muestra la prueba de Levene. Los estadísticos mostrados en esta tabla evalúan la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de las 3 columnas son iguales. De particular interés es el valor-P. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por

debajo de 0.05 (en este caso no hay ninguno) indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

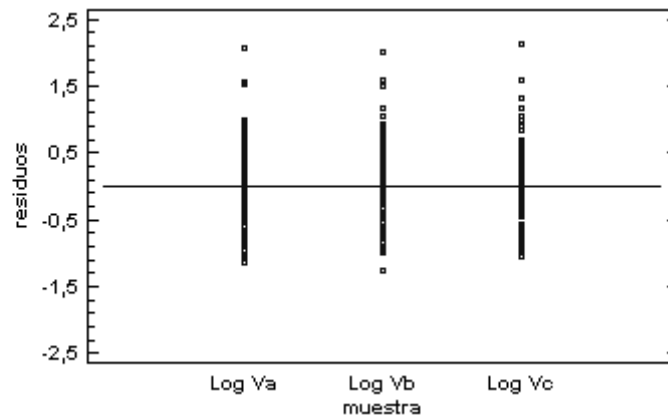


Figura A3.41. Gráfico de residuos para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

Tabla A3.41. Prueba de Levene para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,162414	0,850156

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
$\text{Log } V_A / \text{Log } V_B$	0,580224	0,605487	0,918294	0,6527
$\text{Log } V_A / \text{Log } V_C$	0,580224	0,587445	0,975567	0,8961
$\text{Log } V_B / \text{Log } V_C$	0,605487	0,587445	1,06237	0,7494

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las 3 columnas es la misma. Primero se combinan los datos de todas las columnas y se ordenan de menor a mayor. Después, se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada columna. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05 (Tabla A3.42), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla A3.42. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
$\text{Log } V_A$	113	180,257
$\text{Log } V_B$	113	163,761
$\text{Log } V_C$	113	165,982

Estadístico = 1,88547 Valor-P = 0,389561

Por último, se muestra el gráfico de medianas con intervalos del 95,0% de confianza (Figura A3.42) y la prueba de medianas de Mood (Tabla A3.43), que evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 3 muestras son iguales. Lo hace contando el número de observaciones en cada muestra, a cada lado de la mediana global, la cual es igual a 1,0866. Puesto que el valor-P para la prueba de chi-cuadrada es mayor o igual a 0,05, las medianas de las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0%. También se incluyen (si están disponibles) los intervalos del 95,0% de confianza para mediana, basados en los estadísticos de orden de cada muestra.

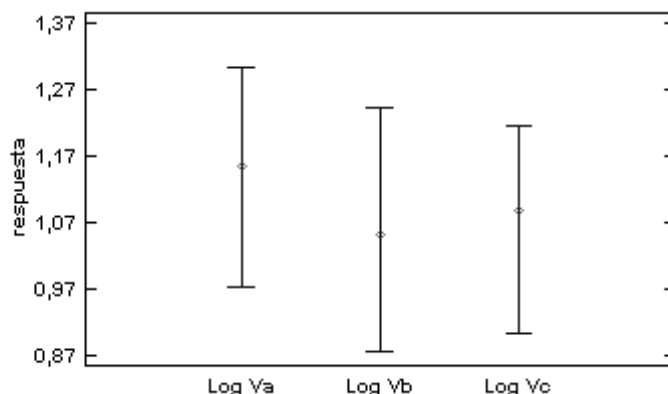


Figura A3.42. Gráfico de medianas para $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$, con intervalos del 95,0% de confianza

Tabla A3.43. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

Total n = 339

Gran mediana = 1,0866

Muestra	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
$\text{Log } V_A$	113	53	60	1,1571	0,97296	1,30153
$\text{Log } V_B$	113	60	53	1,0511	0,877579	1,24348
$\text{Log } V_C$	113	58	55	1,0866	0,903156	1,21478

Estadístico = 0,920426 Valor-P = 0,631149

Por último se aporta el gráfico de cuantiles de las muestras (Figura A3.43).

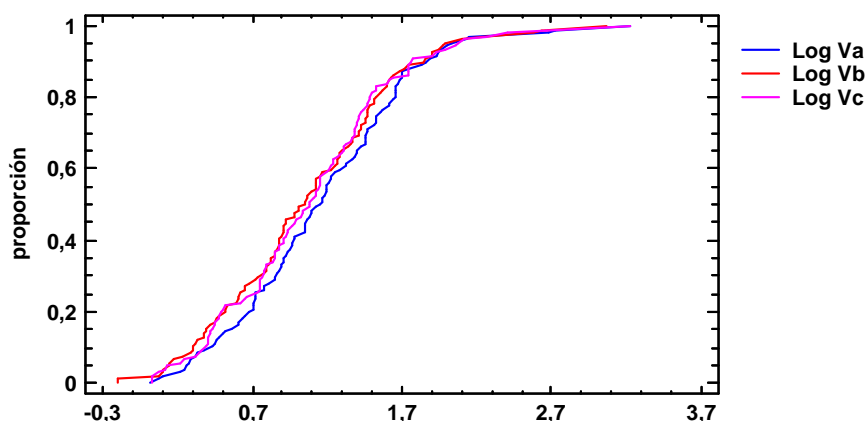


Figura A3.43. Gráfico de cuantiles para las muestras $\text{Log } V_A$, $\text{Log } V_B$ y $\text{Log } V_C$

A3.2.2. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA MASA DE SEDIMENTOS TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ Y $\text{Log } SW_C$

En este apartado se comparan las muestras de $\text{Log } SW_A$, $\text{Log } SW_B$ y $\text{Log } SW_C$, para estudiar si existen diferencias significativas entre las muestras. En primer lugar se muestra el gráfico de dispersión de las muestras (Figura A3.44) y el resumen estadístico de cada una (Tabla A3.44).

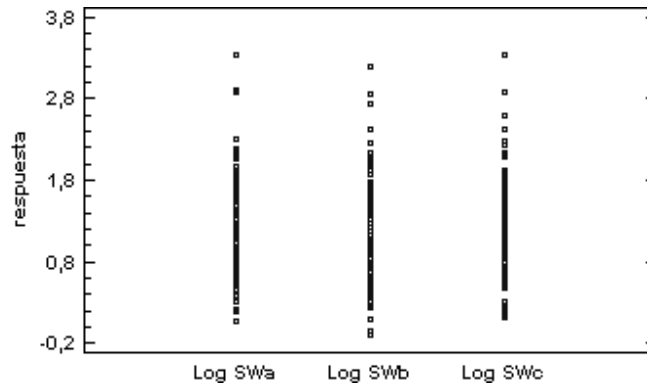


Figura A3.44. Dispersión de las muestras Log SW_A , Log SW_B y Log SW_C

Tabla A3.44. Resumen estadístico de las muestras Log SW_A , Log SW_B y Log SW_C

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Log SW_A	113	1,29048	0,594173	46,0427%	0,0619
Log SW_B	113	1,19202	0,616721	51,7373%	-0,1031
Log SW_C	113	1,21126	0,599952	49,5311%	0,1169
Total	339	1,23126	0,603413	49,0079%	-0,1031

	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Log SW_A	3,3456	3,2837	1,94725	1,66927
Log SW_B	3,1864	3,2895	1,71338	0,871445
Log SW_C	3,3424	3,2255	2,33145	1,67543
Total	3,3456	3,4487	3,35161	2,16667

A continuación se ha realizado el análisis de la varianza (Figura A3.45). De acuerdo con la tabla ANOVA, puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza (Tabla A3.45).

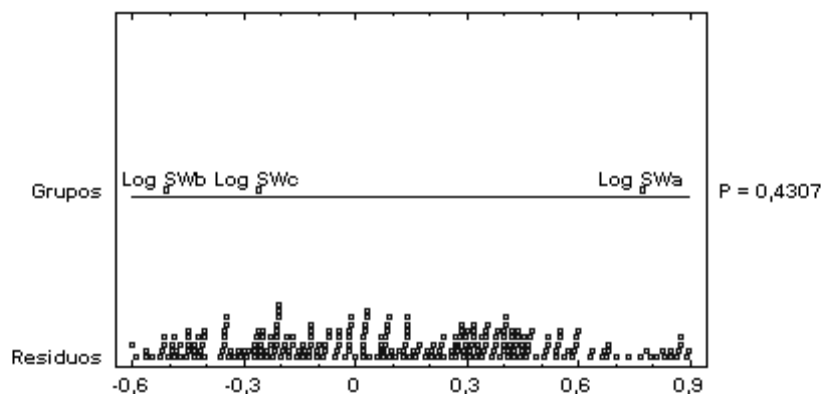


Figura A3.45. Gráfico ANOVA de las muestras Log SW_A , Log SW_B y Log SW_C

Tabla A3.45. Tabla ANOVA para las muestras Log SW_A , Log SW_B y Log SW_C

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,615466	2	0,307733	0,84	0,4307
Intra grupos	122,453	336	0,364443		
Total (Corr.)	123,068	338			

Los intervalos mostrados en la Figura A3.46 están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. La Tabla A3.46 muestra la media para



cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media y un intervalo alrededor de cada media. Si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Además, en la Figura A3.47 se muestra el gráfico de caja y bigotes de las muestras.

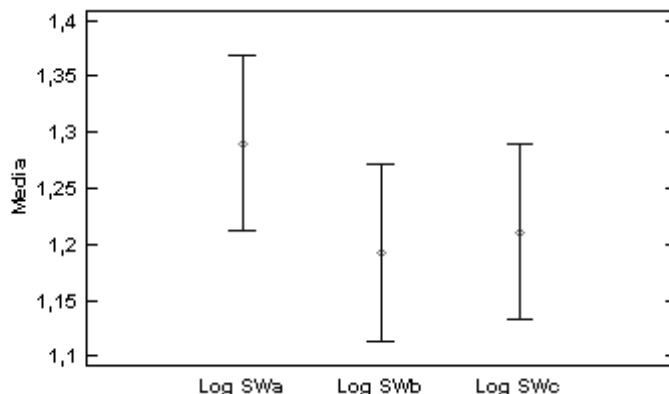


Figura A3.46. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$, con intervalos de confianza del 95,0%

Tabla A3.46. Tabla de Medias para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$, con intervalos de confianza del 95,0%

	Casos	Media	Error Est.		
			(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
$Log SW_A$	113	1,29048	0,0567905	1,21149	1,36947
$Log SW_B$	113	1,19202	0,0567905	1,11303	1,27101
$Log SW_C$	113	1,21126	0,0567905	1,13227	1,29025
Total	339	1,23126			

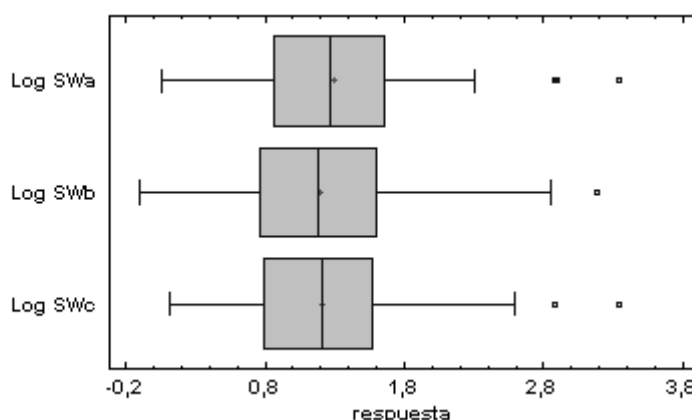


Figura A3.47. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$

La Tabla A3.47 muestra la prueba de múltiples rangos, de acuerdo con la cual no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la columna derecha se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.



Tabla A3.47. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$
Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
$Log SW_B$	113	1,19202	X
$Log SW_C$	113	1,21126	X
$Log SW_A$	113	1,29048	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
$Log SW_A - Log SW_B$		0,0984584	0,157982
$Log SW_A - Log SW_C$		0,0792186	0,157982
$Log SW_B - Log SW_C$		-0,0192398	0,157982

* indica una diferencia significativa.

En la Figura A3.48 se observa el gráfico de residuos para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$.

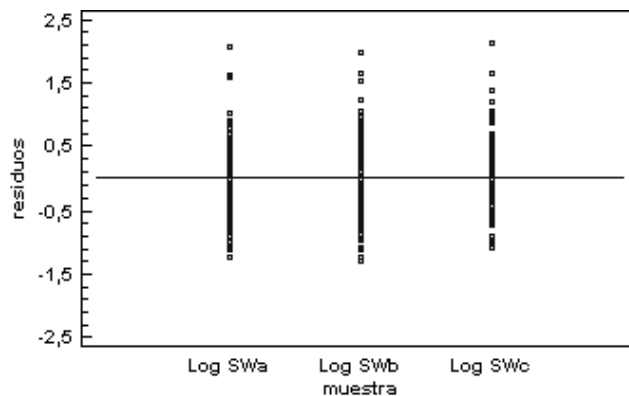


Figura A3.48. Gráfico de residuos para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$

En la Tabla A3.48 se muestra la prueba de Levene. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por debajo de 0.05 (en este caso no hay ninguno) indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

Tabla A3.48. Prueba de Levene para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,119805	0,887131

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
$Log SW_A / Log SW_B$	0,594173	0,616721	0,928213	0,6941
$Log SW_A / Log SW_C$	0,594173	0,599952	0,980828	0,9186
$Log SW_B / Log SW_C$	0,616721	0,599952	1,05668	0,7710

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las 3 columnas es la misma. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05 (Tabla A3.49), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.



Tabla A3.49. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
$Log SW_A$	113	180,575
$Log SW_B$	113	163,403
$Log SW_C$	113	166,022

Estadístico = 2,01393 Valor-P = 0,365326

Por último, se muestra el gráfico de medianas con intervalos del 95,0% de confianza (Figura A3.49) y la prueba de medianas de Mood (Tabla A3.50), que evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 3 muestras son iguales. Puesto que el valor-P para la prueba de chi-cuadrada es mayor o igual a 0,05, las medianas de las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0%.

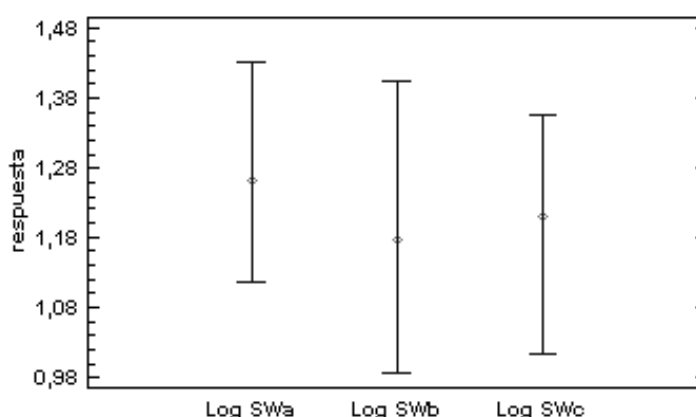


Figura A3.49. Gráfico de medianas para $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$, con intervalos del 95,0% de confianza

Tabla A3.50. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras $Log SW_A$, $Log SW_B$ y $Log SW_C$
Total n = 339

Gran mediana = 1,2183

Muestra	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
$Log SW_A$	113	53	60	1,2637	1,11514	1,43068
$Log SW_B$	113	60	53	1,1774	0,988041	1,40499
$Log SW_C$	113	57	56	1,2085	1,01549	1,35586

Estadístico = 0,873164 Valor-P = 0,646242

Por último se aporta el gráfico de cuantiles de las muestras (Figura A3.50).

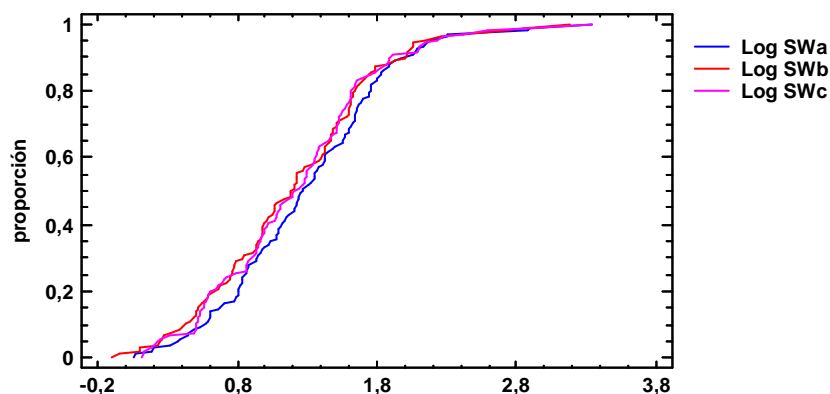


Figura A3.50. Gráfico de cuantiles para las muestras Log SW_A , Log SW_B y Log SW_C

A3.2.3. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA TASA DE EROSIÓN TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: Log SY_A , Log SY_B Y Log SY_C

En este apartado se comparan las muestras de Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C , para estudiar si existen diferencias significativas entre las muestras. En primer lugar se muestra el gráfico de dispersión de las muestras (Figura A3.51) y el resumen estadístico de cada una (Tabla A3.51).

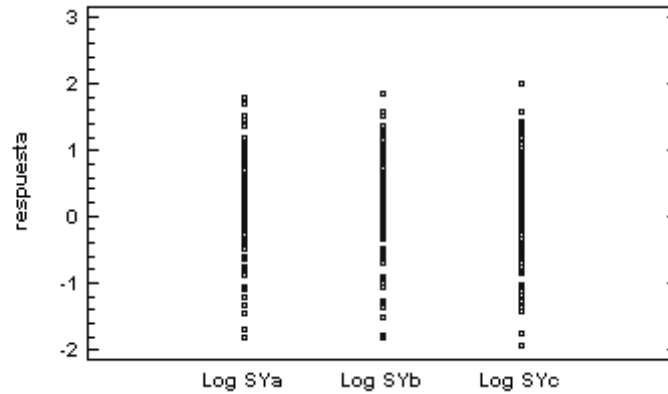


Figura A3.51. Dispersión de las muestras Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C

Tabla A3.51. Resumen estadístico de las muestras Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Log SY_A	113	0,280539	0,735477	262,166%	-1,802
Log SY_B	113	0,182079	0,724507	397,908%	-1,824
Log SY_C	113	0,201318	0,718721	357,008%	-1,9386
Total	339	0,221312	0,725373	327,76%	-1,9386

	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Log SY_A	1,777	3,579	-2,51482	0,470456
Log SY_B	1,8411	3,6651	-2,236	0,535796
Log SY_C	2,0007	3,9393	-2,2408	0,974855
Total	2,0007	3,9393	-3,96347	0,925544

A continuación se ha realizado el análisis de la varianza (Figura A3.52). De acuerdo con la tabla ANOVA, puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza (Tabla A3.52).

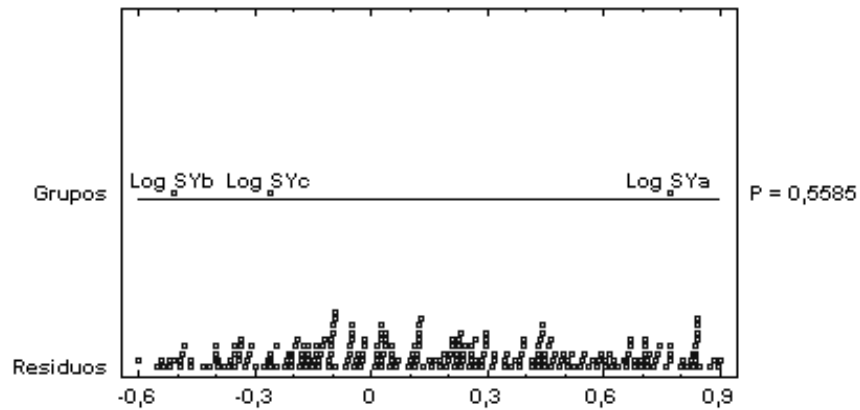


Figura A3.52. Gráfico ANOVA de las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$

Tabla A3.52. Tabla ANOVA para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,615494	2	0,307747	0,58	0,5585
Intra grupos	177,228	336	0,527466		
Total (Corr.)	177,844	338			

Los intervalos mostrados en la Figura A3.53 están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. La Tabla A3.53 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media y un intervalo alrededor de cada media. Si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Además, en la Figura A3.54 se muestra el gráfico de caja y bigotes de las muestras.

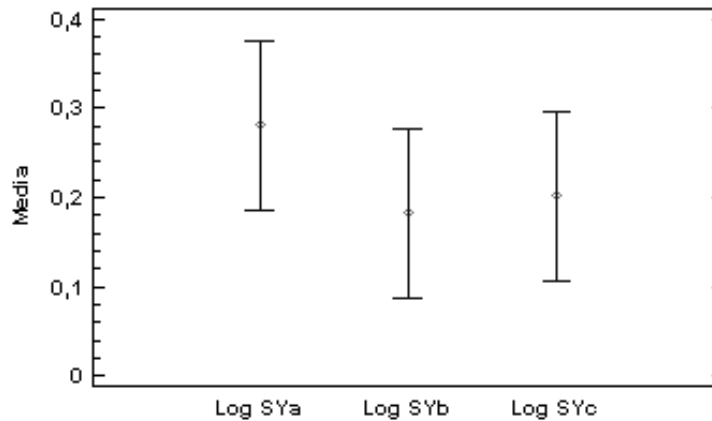


Figura A3.53. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$, con intervalos de confianza del 95,0%

Tabla A3.53. Tabla de Medias para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$, con intervalos de confianza del 95,0%

	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
$Log SY_A$	113	0,280539	0,0683216	0,185509	0,375569
$Log SY_B$	113	0,182079	0,0683216	0,0870492	0,277108
$Log SY_C$	113	0,201318	0,0683216	0,106288	0,296347
Total	339	0,221312			

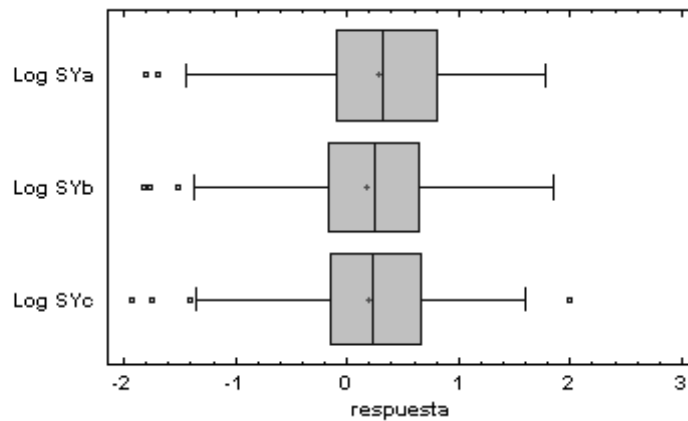


Figura A3.54. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$

La Tabla A3.54 muestra la prueba de múltiples rangos, de acuerdo con la cual no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la columna derecha se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla A3.54. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$
Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
$Log SY_B$	113	0,182079	X
$Log SY_C$	113	0,201318	X
$Log SY_A$	113	0,280539	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
$Log SY_A - Log SY_B$		0,0984602	0,190059
$Log SY_A - Log SY_C$		0,0792212	0,190059
$Log SY_B - Log SY_C$		-0,0192389	0,190059

* indica una diferencia significativa.

En la Figura A3.55 se observa el gráfico de residuos para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$.

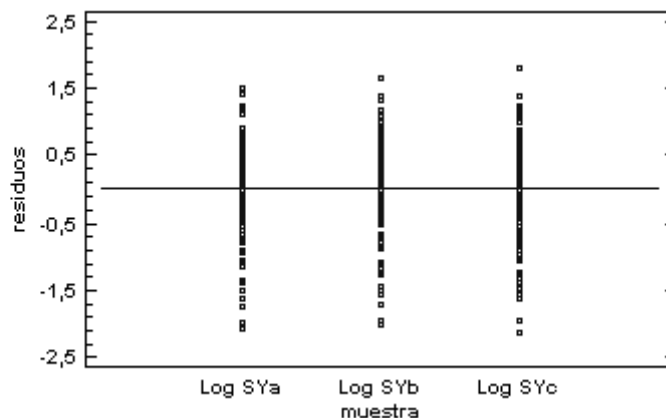


Figura A3.55. Gráfico de residuos para las muestras $Log SY_A$, $Log SY_B$ y $Log SY_C$



En la Tabla A3.55 se muestra la prueba de Levene. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por debajo de 0.05 (en este caso no hay ninguno) indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

Tabla A3.55. Prueba de Levene para las muestras Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,0380789	0,962641

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
$\text{Log SY}_A / \text{Log SY}_B$	0,735477	0,724507	1,03051	0,8739
$\text{Log SY}_A / \text{Log SY}_C$	0,735477	0,718721	1,04717	0,8077
$\text{Log SY}_B / \text{Log SY}_C$	0,724507	0,718721	1,01617	0,9325

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las 3 columnas es la misma. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05 (Tabla A3.56), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla A3.56. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
Log SY_A	113	179,124
Log SY_B	113	164,217
Log SY_C	113	166,659

Estadístico = 1,50413 Valor-P = 0,471392

A continuación se muestra el gráfico de medianas con intervalos del 95,0% de confianza (Figura A3.56) y la prueba de medianas de Mood (Tabla A3.57), que evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 3 muestras son iguales. Puesto que el valor-P para la prueba de chi-cuadrada es mayor o igual a 0,05, las medianas de las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0%.

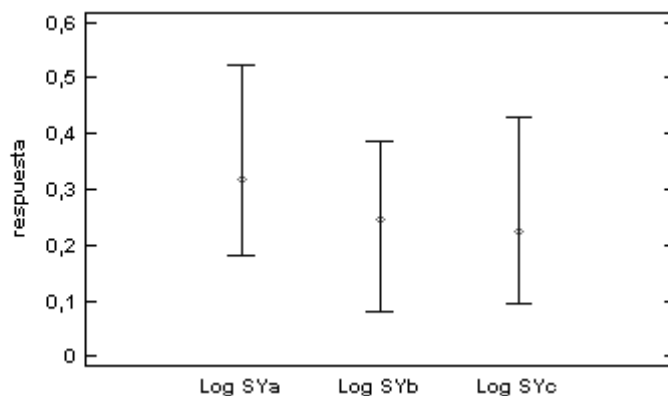


Figura A3.56. Gráfico de medianas para Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C , con intervalos del 95,0% de confianza

Tabla A3.57. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras Log SY_A , Log SY_B y Log SY_C

Total n = 339
Gran mediana = 0,2809



Muestra	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
Log SY _A	113	52	61	0,3198	0,181269	0,523951
Log SY _B	113	58	55	0,2448	0,0808313	0,387921
Log SY _C	113	60	53	0,2252	0,0963917	0,429973

Estadístico = 1,22715 Valor-P = 0,541412

Por último se aporta el gráfico de cuantiles de las muestras (Figura A3.57).

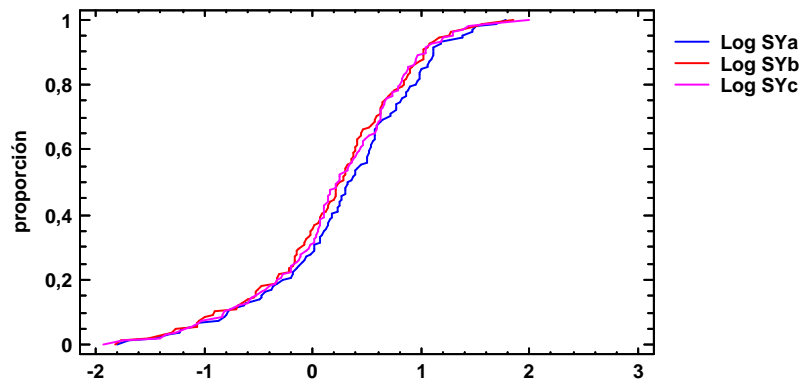


Figura A3.57. Gráfico de cuantiles para las muestras Log SY_A, Log SY_B y Log SY_C

A3.2.4. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LA TASA TOTAL DE SEDIMENTOS TRAS EL CAMBIO DE VARIABLE: Log TSY_A, Log TSY_B Y Log TSY_C

En este apartado se comparan las muestras de Log TSY_A, Log TSY_B y Log TSY_C, para estudiar si existen diferencias significativas entre las muestras. En primer lugar se muestra el gráfico de dispersión de las muestras (Figura A3.58) y el resumen estadístico de cada una (Tabla A3.58).

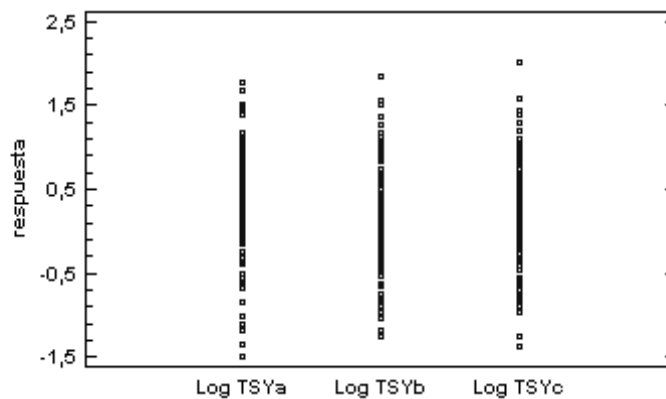


Figura A3.58. Dispersión de las muestras Log TSY_A, Log TSY_B y Log TSY_C

Tabla A3.58. Resumen estadístico de las muestras Log TSY_A, Log TSY_B y Log TSY_C

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo
Log TSY _A	113	0,327709	0,674379	205,786%	-1,4881
Log TSY _B	113	0,254444	0,628595	247,046%	-1,2554
Log TSY _C	113	0,268942	0,630221	234,334%	-1,3742
Total	339	0,283698	0,643619	226,868%	-1,4881

Máximo Rango Sesgo Estandarizado Curtosis Estandarizada



<i>Log TSY_A</i>	1,7781	3,2662	-1,66877	-0,111047
<i>Log TSY_B</i>	1,842	3,0974	-0,612416	-0,445304
<i>Log TSY_C</i>	2,0013	3,3755	-0,705456	0,0810606
Total	2,0013	3,4894	-1,71413	-0,441273

A continuación se ha realizado el análisis de la varianza (Figura A3.59). De acuerdo con la tabla ANOVA, puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza (Tabla A3.59).

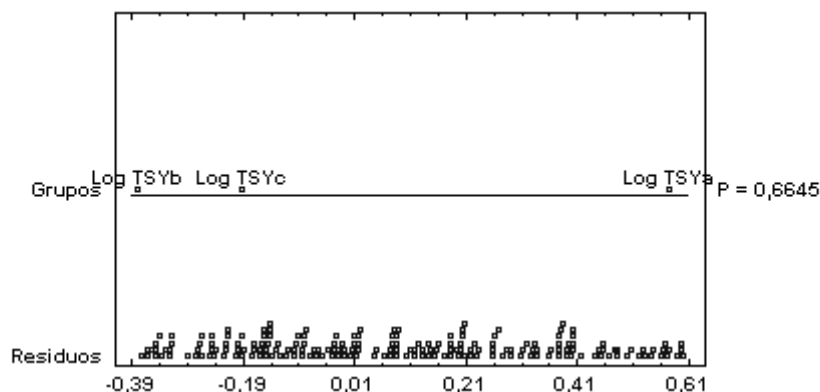


Figura A3.59. Gráfico ANOVA de las muestras *Log TSY_A*, *Log TSY_B* y *Log TSY_C*

Tabla A3.59. Tabla ANOVA para las muestras *Log TSY_A*, *Log TSY_B* y *Log TSY_C*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,340185	2	0,170093	0,41	0,6645
Intra grupos	139,675	336	0,415699		
Total (Corr.)	140,015	338			

Los intervalos mostrados en la Figura A3.60 están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. La Tabla A3.60 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media y un intervalo alrededor de cada media. Si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Además, en la Figura A3.61 se muestra el gráfico de caja y bigotes de las muestras.

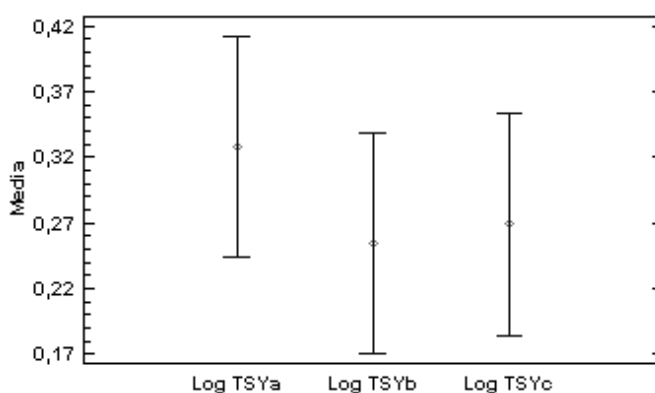


Figura A3.60. Gráfico de medias y LSD de Fisher para las muestras *Log TSY_A*, *Log TSY_B* y *Log TSY_C*, con intervalos de confianza del 95,0%

Tabla A3.60. Tabla de Medias para las muestras *Log TSY_A*, *Log TSY_B* y *Log TSY_C*, con intervalos de confianza del 95,0%



	Error Est.				
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Log TSY _A	113	0,327709	0,0606527	0,243346	0,412072
Log TSY _B	113	0,254444	0,0606527	0,170081	0,338807
Log TSY _C	113	0,268942	0,0606527	0,184579	0,353304
Total	339	0,283698			

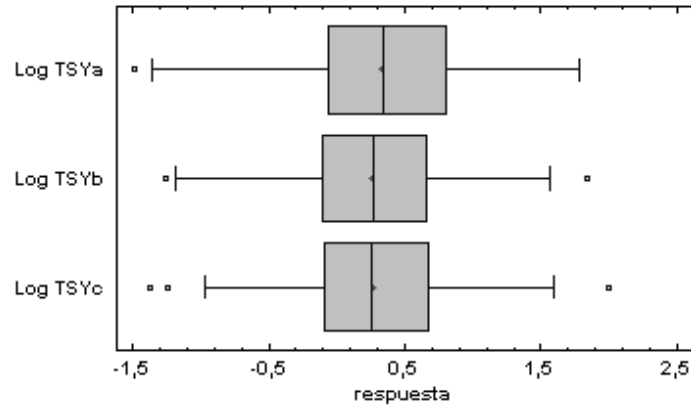


Figura A3.61. Gráfico de Caja y Bigotes para las muestras Log TSY_A, Log TSY_B y Log TSY_C

La Tabla A3.61 muestra la prueba de múltiples rangos, de acuerdo con la cual no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la columna derecha se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla A3.61. Pruebas de Múltiple Rangos para las muestras Log TSY_A, Log TSY_B y Log TSY_C
Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Log TSY _B	113	0,254444	X
Log TSY _C	113	0,268942	X
Log TSY _A	113	0,327709	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Log TSY _A - Log TSY _B		0,0732646	0,168726
Log TSY _A - Log TSY _C		0,0587673	0,168726
Log TSY _B - Log TSY _C		-0,0144973	0,168726

* indica una diferencia significativa.

En la Figura A3.62 se observa el gráfico de residuos para las muestras Log TSY_A, Log TSY_B y Log TSY_C.

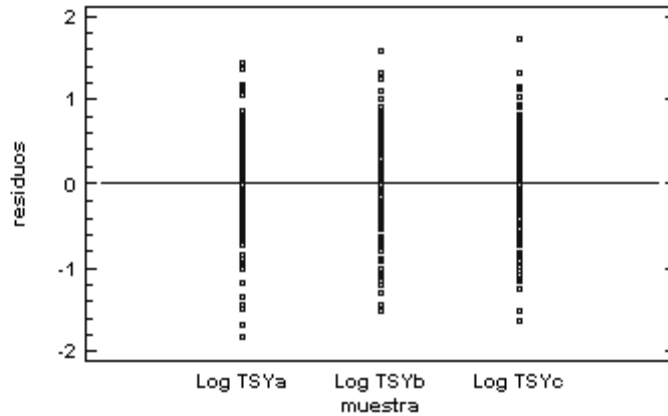


Figura A3.62. Gráfico de residuos para las muestras Log TSY_A , Log TSY_B y Log TSY_C

En la Tabla A3.62 se muestra la prueba de Levene. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por debajo de 0.05 (en este caso no hay ninguno) indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

Tabla A3.62. Prueba de Levene para las muestras Log TSY_A , Log TSY_B y Log TSY_C

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,259963	0,771235

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
$\text{Log TSY}_A / \text{Log TSY}_B$	0,674379	0,628595	1,15098	0,4580
$\text{Log TSY}_A / \text{Log TSY}_C$	0,674379	0,630221	1,14505	0,4747
$\text{Log TSY}_B / \text{Log TSY}_C$	0,628595	0,630221	0,994848	0,9782

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las 3 columnas es la misma. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05 (Tabla A3.63), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla A3.63. Prueba de Kruskal-Wallis para las muestras Log TSY_A , Log TSY_B y Log TSY_C

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
Log TSY_A	113	178,168
Log TSY_B	113	164,655
Log TSY_C	113	167,177

Estadístico = 1,2148 Valor-P = 0,544764

A continuación se muestra el gráfico de medianas con intervalos del 95,0% de confianza (Figura A3.63) y la prueba de medianas de Mood (Tabla A3.64), que evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 3 muestras son iguales. Puesto que el valor-P para la prueba de chi-cuadrada es mayor o igual a 0,05, las medianas de las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0%.

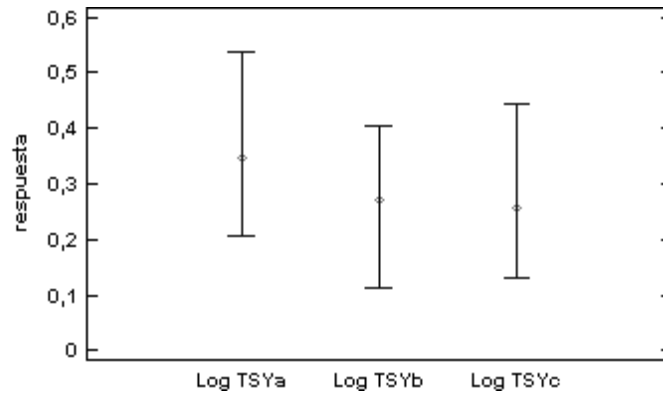


Figura A3.63. Gráfico de medianas para Log TSY_A , Log TSY_B y Log TSY_C , con intervalos del 95,0% de confianza

Tabla A3.64. Prueba de la Mediana de Mood para las muestras Log TSY_A , Log TSY_B y Log TSY_C

Total n = 339

Gran mediana = 0,3033

Muestra	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
Log TSY_A	113	52	61	0,3456	0,205711	0,538521
Log TSY_B	113	58	55	0,2709	0,113351	0,404234
Log TSY_C	113	60	53	0,257	0,130255	0,444157

Estadístico = 1,22715 Valor-P = 0,541412

Por último se aporta el gráfico de cuantiles de las muestras (Figura A3.64).

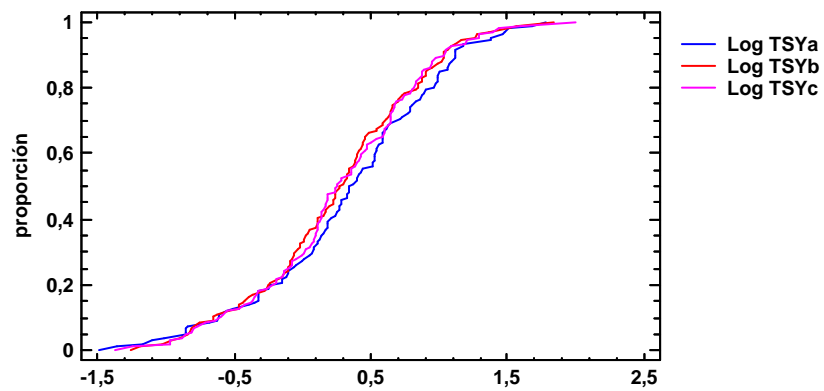


Figura A3.64. Gráfico de cuantiles para las muestras Log TSY_A , Log TSY_B y Log TSY_C

ANEXO IV:

**Aportaciones científicas de esta
tesis durante su realización**



Este trabajo ha producido una serie de publicaciones durante su realización. Estas publicaciones, que se exponen a texto completo seguidamente, son las siguientes:

- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; Ramos, I.; 2012. Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales. En: *Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 2012)*. ISBN: 978-84-695-6377-9
- Mongil, J.; Navarro, J.; Cruz, V.; Díaz, V.; 2013. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 38: 107-113.
- Ramos, I.; Navarro, J.; Bartolomé, D.; Díaz, V.; Mongil, J.; 2013. Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). En: G. Montero González, M. Guijarro Guzmán et al. (eds.). *Actas 6º Congreso Forestal Español CD-ROM 6CFE01-269*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2014. Propuesta de una nueva metodología para determinar la efectividad de los diques en la retención de sedimentos. *Cuadernos de investigación geográfica*, 40(1): 169-190.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2014. Topographical surveying for improved assessment of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badlands restoration site (Central Spain). *Journal of Soils and Sediments*. DOI 10.1007/s11368-014-0958-5. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11368-014-0958-5> .

Además, la metodología aquí propuesta está siendo aplicada en otros trabajos:

- Ramos, I.; Navarro, J.; Bartolomé, D.; Díaz, V.; Mongil, J.; 2013. Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). En: G. Montero González, M. Guijarro Guzmán et al. (eds.). *Actas 6º Congreso Forestal Español CD-ROM 6CFE01-269*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.
- Ramos, I.; 2014. *Eficacia de los diques forestales en el control erosivo en cárcavas corregidas durante las restauraciones del siglo XX en los términos municipales de Saldaña y Lobera de la Vega (Palencia)*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Valladolid. Palencia.



Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales

Autor: Virginia Díaz Gutiérrez

Institución: Universidad Católica de Ávila

Otros autores: Jorge Mongil Manso (Universidad Católica de Ávila); Joaquín Navarro Hevia (Universidad de Valladolid); Iván Ramos Díaz (Universidad de Valladolid)

Resumen

La erosión del suelo es un problema ambiental grave, que afecta de manera moderada o severa al 80 % de los terrenos cultivados del mundo y supone unas pérdidas anuales en la producción agrícola de 42.000 millones de dólares. La erosión en cárcavas es una de las formas de erosión hídrica que se presenta con notable frecuencia en los climas semiáridos. Se trata de una serie de incisiones profundas que se producen en las laderas, cuyo desarrollo se debe a avenidas bruscas e intermitentes, condicionado así mismo por factores climáticos, edáficos y geomorfológicos, entre otros. Si las cárcavas progresan en una amplia extensión de terreno se puede llegar a un paisaje de morfología abarrancada que recibe la denominación de badlands. Las badlands, aunque sólo ocupan una extensión alrededor del 5% en el sur de Europa, suelen ser responsables del 50% al 80% de la emisión de sedimentos dentro de sus cuencas, y en España se han registrado tasas de erosión que oscilan entre varias toneladas por hectárea y año hasta casi un centenar.

La restauración de terrenos afectados por cárcavas requiere de elevadas inversiones, por lo que la prevención es lo más recomendable, generalmente mediante el mantenimiento de cubiertas vegetales densas que constituyan una protección natural del suelo. No obstante, existe una amplia experiencia en técnicas de restauración, que pasan por la recuperación de una cubierta forestal y la instalación de obras de ingeniería civil – fundamentalmente diques forestales- generalmente incluidas dentro de un proyecto de restauración hidrológico-forestal. La restauración de la vegetación suele ser una medida muy efectiva a medio y largo plazo, mientras que los diques frenan la erosión en el cauce, retienen los sedimentos generados en las laderas y los deslizamientos controlando el avance de las cárcavas temporalmente, hasta que la vegetación empieza a cumplir eficazmente su función protectora del suelo.

Si respecto a los trabajos de restauración de la cubierta vegetal existe un amplio consenso en cuanto a su eficiencia en la lucha contra la erosión, algunos autores consideran que los diques de retención de sedimentos no siempre son necesarios ni efectivos. Para evaluar los efectos de estas obras, en este trabajo se realiza una revisión del problema de la erosión en cárcavas, de los procesos que las inician y desarrollan y, especialmente, del papel de los diques en el control y retención de sedimentos así como de sus efectos en la morfología de los cauces, las variaciones de flujo y su efecto barrera.

Palabras claves: badlands; restauración hidrológico-forestal; hidráulica torrencial; estabilización de cauces; presas de retención.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo por acción del agua y del viento es un problema constante desde que la humanidad comenzó a cultivar la tierra, que causa la pérdida y redistribución del suelo, la degradación de su estructura, el arrastre de materia orgánica y nutrientes, y, como consecuencia, un descenso de su fertilidad y una pérdida de productividad de las tierras afectadas (Morgan, 1997). La carta mundial de los suelos (FAO, 1981) pone de relieve la importancia del suelo como un componente esencial del medio ambiente sobre el que se desarrolla la vida, cuyo uso no debe causar su degradación, ya que las consecuencias en términos de pérdida de suelo serían irreparables. Para ofrecer una idea de la magnitud del problema, la erosión y la desertificación ponen en peligro la salud y los medios de vida de más de 1.000 millones de personas, y en términos monetarios, según la ONU, causan unas pérdidas anuales en la producción agrícola de 42.000 millones de dólares (Alfonso, 2005). Este dato pone de manifiesto la necesidad de preservar los suelos en su estado natural, y de restaurar los suelos que se encuentren desprotegidos. En este sentido, Lal & Steward (1995) estiman que el 80 % de las tierras agrícolas del mundo sufren erosión moderada a severa, y el 10 % de ellas, erosión ligera a moderada. Por otra parte, el proyecto internacional “Global Assessment of Human Induced Soil Degradation” (GLASOD) elaborado en 1990 por el programa “United Nations Environment Programme” (UNEP) señala el alto grado de degradación que presentan los suelos de todo el mundo. En España se observa un estado de degradación de los suelos que varía de un valor medio a muy alto, según la zona. En una versión más extensa del mapa se observa que esta degradación está producida principalmente por erosión hídrica, con valores que varían de medio a muy alto (GCMD, 2011). De hecho, la erosión es uno de los procesos más importantes que causan estos valores de degradación del suelo en la región mediterránea (Ibáñez *et al.*, 2003).

La erosión es un problema ambiental grave en España, de forma que en varias ocasiones ha sido calificado por las Naciones Unidas como el país europeo con mayor riesgo de desertificación por erosión (Rubio, 2005). Prueba de ello son los amplios fondos que destina la Administración Española a trabajos de control de la erosión y del transporte de sedimentos, y los diversos programas y proyectos españoles, como el LUCDEME (Lucha contra la Erosión en el Mediterráneo) o el plan nacional de I+D, e incluso de la Unión Europea, como CORINE (Soil Erosion Risk and Important Land Resources), MEDALUS (Usos del Suelo y Desertificación en el Mediterráneo) o HERMES (Procesos de Erosión-Sedimentación) (López Bermúdez & Romero, 1998; Boix-Fayos *et al.*, 2008). Alfonso (2005) estima que la mitad de la superficie de la Península Ibérica sufre un riesgo moderado a muy grave de desertificación, y Rubio (2005) indica que un 10% de ésta sufre procesos de erosión y desertificación que pueden ser irreversibles. La pérdida de suelo por erosión en nuestro país ha sido estimada por De Alba (1998) en $23,37 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, con valores máximos de $47,8$ y $44,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente, en las cuencas del Sur-Mediterráneo y Guadalquivir, y mínimos de $4,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en la cuenca norte (Ibáñez *et al.*, 2003). De acuerdo con los mapas de estados erosivos elaborados por el ICONA y la Dirección General de Conservación de la Naturaleza entre 1987 y 2002, la intensidad del proceso de erosión supera los límites tolerables en torno al 45 % de la superficie de España, y unas 6 millones de hectáreas de ésta sufre erosión muy severa, con arrastres que ocasionan unas pérdidas de suelo superiores a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, cifras muy elevadas si contrastamos con la tasa de formación de suelos, que

varía entre 2 y 12 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ (Ibáñez *et al.*, 2003; MMAMRM, 2008). En la tabla 1 se pueden observar las pérdidas medias de suelo que se producen en función de los distintos usos de suelo que se determinaron para la elaboración del mapa de estados erosivos.

Tabla 1. Pérdidas de suelo en los distintos usos del suelo (MMAMRM, 2008).

USO DEL SUELO	SUPERFICIE (ha)	PÉRDIDAS MEDIAS (Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
Cultivos de regadío	3.054.078	10,35
Cultivos arbóreos y viñedos de secano	5.113.437	78,93
Cultivos herbáceos de secano	14.804.776	30,53
Erial a pastos, matorral disperso y arbolado con cabida cubierta < 0,2	8.231.174	17,46
Pastizales permanentes	2.141.306	8,08
Arbustos y matorral	5.200.907	19,14
Arbolado con cabida cubierta entre 0,2 y 0,7	5.984.709	8,36
Arbolado con cabida cubierta > 0,7	4.535.843	5,16

Las cárcavas son pequeños valles de paredes verticales y cabeceras verticalizadas y perfiles longitudinales de pendiente elevada, que transmiten flujos efímeros y están sujetos a una intensa erosión hídrica (Lucía *et al.*, 2008). Constituyen una serie de profundas incisiones inscritas en la ladera y sujetas a avenidas bruscas e intermitentes, y que surgen cuando una corriente de agua natural rompe su estado de equilibrio metaestable (Faustino, 1985; Hudson, 1982; Rivera *et al.*, 2007). Son geoformas que normalmente aparecen asociadas a litologías fácilmente erosionables, y a regímenes climáticos con cierto grado de aridez (Vicente, 2009; Vicente *et al.*, 2009). La erosión hídrica en cárcavas se ha convertido en un problema de ámbito mundial (Valentín *et al.*, 2005) por lo que ha sido objeto de numerosos estudios durante la última década (Poesen *et al.*, 2003; Casali & Jiménez, 2007; Gómez *et al.*, 2011).

La existencia de cárcavas indica que el terreno en el que se localizan ha sufrido o está sufriendo un grado elevado de degradación, de forma que una erosión intensa en cárcavas y barrancos en una zona concreta genera un paisaje fuertemente disectado denominado malas tierras, mal país o *badlands*, si bien puede haber terrenos acaravados relativamente estables, como el caso del Desierto de Tabernas en el sureste de España (Cantón *et al.*, 2001). Las *badlands*, a pesar de que ocupan solo un 5 % en el sur de Europa (Poesen & Hooke, 1997), son la fuente principal de sedimentos dentro de sus cuencas (Clotet *et al.*, 1987; Clarke & Rendell, 2010), alcanzando tasas de hasta el 80 % (Poesen *et al.*, 2002; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009) e incluso hasta del 94 % (Poesen *et al.*, 2003). Por otra parte, en cuencas de Iowa (EEUU) se ha comprobado que la contribución de las cárcavas a la cantidad total de sedimentos que circulan por los cauces va desde un 20 % hasta un 34 % (Piest & Bowie 1974; Thomas *et al.*, 2004). En ocasiones, incluso con vegetación (Hooke *et al.*, 2007), suelen ser importantes focos de erosión donde la meteorización del terreno, sus características edáficas, la red de drenaje asociada y los procesos de tubificación (Faulkner *et al.*, 2008), entre otros, generan ingentes cantidades de sedimentos. En

Basilicata (Italia) se han registrado rebajamientos anuales del terreno entre 7 y 18 mm (Clark & Rendell, 2006) y en España, tasas de erosión entre 32 y 77 Mg·ha⁻¹·año⁻¹, en *badlands* desnudas en las Bardenas Reales (Desir & Marín, 2009). En *badlands* con vegetación, en el Penedés aún se han detectado cifras entre 16 y 63 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009); pero cuando la revegetación es mayor del 30 % en el lecho, las cárcavas resultan casi inactivas (Rey, 2003; Hooke, 2006; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009) o son responsables una baja erosión (Cantón *et al.*, 2001). De Luna *et al.* (2004) han medido el retroceso de cabeceras de cárcavas de grandes dimensiones en Granada, mediante fotografías aéreas entre 1956 y 1994, registrando valores de 0,2 a 1,7 m·año⁻¹.

La erosión en cárcavas es un proceso complejo y diverso, relacionado en ocasiones con un deficiente manejo del bosque (Navarro *et al.*, 2012; Mongil *et al.*, 2012) y que en nuestro país muestra una creciente preocupación (Gómez *et al.*, 2011). Por ello, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión del conocimiento existente sobre la erosión en cárcavas y sobre las principales técnicas que se emplean en su restauración, especialmente los diques forestales.

LA EROSIÓN EN CÁRCAVAS

La erosión en cárcavas es un fenómeno que se da bajo diversas condiciones climáticas (Gómez *et al.*, 2011), aunque más comúnmente en climas semiáridos y sobre suelos estériles y con vegetación abierta, con un uso inadecuado del terreno o inapropiado diseño del drenaje de las vías de comunicación. Las incisiones que constituyen las cárcavas, se ven potenciadas por avenidas violentas y discontinuas típicas del clima mediterráneo, lluvias intensas o continuas sobre terrenos desnudos o por la concentración de flujos superficiales fomentados por obras de drenaje de caminos o carreteras. También los procesos subsuperficiales de tubificación o *piping* en terrenos arcillosos o arcillolimosos provocan la formación de galerías internas en el terreno que llevan al colapso del mismo y a la aparición de cárcavas. En general, los cursos de agua fluctúan hacia un punto de equilibrio, de forma que si el caudal se incrementa, el canal se ensanchará, profundizará o incrementará su pendiente hasta conseguirlo, y sólo podrá recuperar su estado original si las alteraciones son leves; pero si la cárcava comienza, será necesario un esfuerzo de mayor magnitud para conseguir volver a esa situación inicial. En la denominada erosión por cárcavas, el escurrimiento superficial es grande y con elevada energía erosiva, de forma que se concentra dando lugar a surcos o cárcavas que pueden alcanzar decenas de metros, tanto en dimensión longitudinal como altitudinal, originando, como consecuencia, contaminación, debido a la movilización de sedimento que producen, y causando una pérdida de productividad del terreno afectado (Faustino, 1985; Rivera *et al.*, 2007; Casalí *et al.*, 1999).

Si nos fijamos en el perfil longitudinal de la cárcava, en su fase inicial, la sección del canal es más profunda que la original, y su rugosidad disminuye al desaparecer la cubierta vegetal, consiguiendo una nueva pendiente más llana que la original, y una mayor altura de caída del agua conforme va retrocediendo la cabecera de la cárcava (Hudson, 1982; Clarke & Rendell, 2006). No obstante, la extensión de las cárcavas se realiza en tres direcciones (Faustino, 1985; FAO, 1992): en longitud, debido al avance y caída de la escorrentía; en anchura, por las mismas razones anteriores, o por caída de las paredes

de las laderas por falta de estabilidad; y en profundidad, por efecto de la escorrentía, hasta llegar a su estabilización en el nivel de base. Este avance en extensión de las cárcavas se ve favorecido en gran parte por las prácticas inadecuadas de utilización del suelo, como en el caso de construcciones civiles y minería, que originan cortes del terreno que quedan a merced del agua, y por la realización de surcos en campos de cultivo, que gracias a la acción de la lluvia y la concentración de flujos tienden a profundizarse y, con el tiempo, a causar este proceso (León, 2005). El fuego o el sobrepastoreo son acciones que reducen la cubierta vegetal, provocando una reducción de la resistencia, o, dicho de otra manera, una disminución de la rugosidad, que origina una mayor velocidad del caudal, con sus correspondientes consecuencias en términos de erosión. Ejemplos de acciones que provocan un aumento en la velocidad del flujo, y por tanto de la erosión, son la construcción de un puente o el trazado de aliviaderos de tierra en pequeños embalses, así como la concentración de escorrentías en ciertos puntos a través del diseño del drenaje de obras de infraestructura, actuaciones agrarias, etc. Además, hay que recordar que la erosión por cárcavas es la fuente más importante de sólidos en suspensión en los ríos (Hudson, 1982; Clotet *et al.*, 1987; Casalí *et al.*, 1999; Clarke & Rendell, 2010), lo que reduce considerablemente la calidad de las aguas (Simon & Darby, 1999; Zaimas *et al.*, 2009).

Por tanto, la evolución y la forma que van tomando las cárcavas dependerán de varios grupos de factores (Casalí *et al.*, 1999):

- Factores ligados al suelo: erosionabilidad, presencia de horizontes resistentes, presencia de costras o sellado, contenido de humedad (Moore *et al.*, 1988), contenido en sales, naturaleza mineralógica del terreno (arcillas expandibles) (Clotet *et al.*, 1987).
- Factores topográficos: tamaño de la cuenca de aportación (Poesen & Govers, 1990), pendiente del cauce y laderas (Foster, 1986; Poesen & Govers, 1990; Poesen, 1993; Clarke & Rendell, 2006), y su exposición.
- Factores climáticos: intensidad, frecuencia y duración de las precipitaciones.
- Otros factores: la erosión en cárcavas puede ser inducida por cambios en la cubierta vegetal generados por actividades humanas, por el ganado (Shumm, 1999) o por malas prácticas de cultivo. Pero también hay factores naturales como los incendios que destruyen la cubierta vegetal, los fuertes vientos que derrumban el arbolado y que si son precedidos de tormentas generan acumulaciones de agua en puntos concretos del terreno que favorecen el acarcavamiento, los deslizamientos de márgenes fluviales por la socavación de su base, etc.

En función de su temporalidad pueden ser efímeras o permanentes (Gómez *et al.*, 2011). En cuanto a la naturaleza y morfología del terreno se adopta la forma de la cárcava, y podemos distinguir entre cárcavas en V, situadas en terrenos de ladera, o cárcavas en U, que podemos encontrar en terrenos llanos (Núñez, 2001). En el primero de los casos, cuando se produce un crecimiento de las cárcavas hacia arriba y los lados de las laderas, podemos hablar de cárcavas remontantes (FEDERACAFÉ, 1975). Asimismo, Stocking & Murnaham (2003) indican que las cárcavas pueden ser continuas o discontinuas, caracterizadas las segundas por su menor nivel de pendiente con respecto al general del terreno, y porque erosionan ascendiendo hacia la cabecera, aunque la sedimentación se produzca al final de la discontinuidad.

Por otro lado, asumiendo que la profundización de las cárcavas puede generar verdaderos barrancos, y en función de su torrencialidad, entendiendo torrente como una corriente natural de agua caracterizada por crecidas súbitas y violentas, fuertes pendientes y una periodicidad temporal o permanente (Del Palacio, 1999), se puede distinguir entre cárcavas tipo torrentes alpinos o propiamente torrentes alpinos (en los que se han realizado correcciones típicas pirenaicas como las de Canfranc, Arratiecho, Betés, etc.) y cárcavas tipo torrentes-rambla (en las que se han llevado a cabo actuaciones como las de las *badlands* de Murcia, Almería, etc.). Ambos sistemas tienen comportamientos diferentes. Los primeros, de régimen estacional, se sitúan en grandes altitudes, y en cauces estrechos, con pendiente media alta y perfil transversal en forma de V. En estos torrentes se produce erosión laminar y movimientos en masa. Sin embargo, las cárcavas tipo torrentes-rambla, cuyo régimen puede ser estacional o permanente, son típicas de áreas mediterráneas, y se sitúan en pequeñas altitudes. Sus cauces son anchos y de pendiente baja, y se caracterizan por sufrir una erosión lineal, y de ladera y márgenes, y por ser zonas de depósito de sedimentos, razón por la cual poseen perfiles en forma de U muy abierta (Del Palacio, 1999, 2002). Perez-Soba (2009) distingue entre ramblas puras y torrentes ramblas, en función de la morfología del cauce y de la cuenca y de su régimen torrencial.

Por último, hay que señalar que las cárcavas son características de varios tipos paisajes y climas (Gómez *et al.*, 2011), pero aparecen especialmente en climas áridos y semiáridos como el mediterráneo (Clarke & Rendell, 2010), como en Italia (Ciccacci *et al.*, 2008; Clarke & Rendell, 2006), Grecia, Marruecos, Israel (Yair *et al.*, 1980) y España (López Bermúdez & Torcal, 1986; Benito *et al.*, 1992; Navarro *et al.*, 1997; Casalí *et al.*, 1999; Regüés *et al.*, 2000; Cantón *et al.*, 2001; Martín Duque, 2007; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009).

CORRECCIÓN Y CONTROL DE CÁRCAVAS

El control de cárcavas es una tarea ardua y costosa; volver a la posición de equilibrio original requiere un gran esfuerzo. Además, hay que tener en cuenta que la existencia de cárcavas es un reflejo de la degradación de la cuenca o de un manejo hidrológico deficiente de esta. Es necesario estudiar los orígenes de estas cárcavas para que las tareas de control que se lleven a cabo sean efectivas. La solución más lógica teniendo en cuenta estas circunstancias es prevenir y evitar que se produzcan estas cárcavas, o evitar que se continúe erosionando, es decir, en muchas ocasiones será suficiente realizar un control parcial, considerándolas como parte del paisaje (Hudson, 1982); la implantación de una efectiva cubierta vegetal que tapice las paredes de las cárcavas puede frenar su progresión (Navarro *et al.*, 1997; Navarro *et al.*, 2012; Mongil *et al.*, 2012). Rey (2003) y Martínez-Casasnovas *et al.* (2009) señalan que cuando el lecho de las cárcavas tienen una cubierta de vegetación superior al 30 % éstas resultan casi inactivas o explican bajas tasas de erosión (Cantón *et al.*, 2001).

Los objetivos del control de cárcavas justifican su inversión, como cuando se pretenda evitar el descenso de la capa freática, la pérdida de capacidad de almacenamiento de embalses, la posibilidad de que afecte a construcciones (puentes, carreteras o edificaciones), afecten a la calidad del agua, perturben los hábitat acuáticos de gran valor ecológico o la pérdida de suelo y su productividad. Completando las recomendaciones de Hudson (1982) se señalan una serie de principios a seguir en el control de cárcavas:

- Determinar las causas.
- Determinar los impactos y efectos más significativos en su entorno.
- Diseñar y adoptar medidas proporcionales a los impactos o perturbaciones a corregir.
- Restaurar un balance hidráulico adaptado a las nuevas condiciones (para reducir o controlar el caudal al volumen aceptable para las condiciones originales o las nuevas adoptadas).
- Proteger la zona donde vayan a aplicarse las medidas de recuperación y control.
- Establecer un seguimiento periódico para estudiar la evolución adecuada del sistema e impedir su regeneración.

Entre las técnicas para el control de cárcavas, podemos mencionar en primer lugar técnicas de manejo del suelo que incrementen la infiltración, o construcción de estructuras que conserven o extiendan la escorrentía (terrazas, zanjas de interceptación en cabecera o a media ladera, microcuencas de captación, etc.). Para evitar el avance de la cárcava en tres dimensiones, anteriormente mencionado, se puede utilizar técnicas como realizar su aislamiento de la escorrentía y del ganado, o de otros usos no compatibles (extracción de leñas, utilización de materiales térreos para construcción de adobes, cerámica, etc.), para a continuación realizar su relleno total, parcial o terraplenado, que conllevará su eliminación, o bien suavizar los taludes para construir barreras o forestar la cárcava.

La vegetación en el control de cárcavas

La revegetación de cárcavas es una buena medida para su control, que protege al suelo de la escorrentía a la vez que reduce la velocidad del caudal, y por lo tanto su energía erosiva. Navarro *et al.* (1997) y Navarro *et al.* (2012) indican que en áreas de la región mediterránea, con un clima semiárido, en exposiciones de solana y sobre margas yesíferas o rocas arcilloarenosas, esta técnica no ha dado los resultados esperados, a pesar de que señalen que es preferente actuar con material vegetal antes que con movimientos de tierra o estructuras constructivas. Las dificultades en su implantación se deben a que el suelo de una cárcava suele ser deficiente en nutrientes y en materia orgánica, y con escasa retención de humedad, y a que suelen estar localizadas en zonas de escasas precipitaciones, que no permiten un tapiz vegetal continuo y que deja caminos expeditos para la concentración de escorrentías. Además, los deslizamientos en las paredes de las cárcavas pueden ser objeto de arrastre de las plantaciones realizadas. Sólo si se actúa en un medio suficiente estable y con unas condiciones hídricas apropiadas se consigue la regeneración. Por otro lado, Hudson (1963) indica que los suelos sometidos a acaravamiento suelen tener problemas de salinidad y alcalinidad. Para solucionar las posibles dificultades que puedan surgir se deben elegir las plantas apropiadas, de fácil arraigo y vigorosas, así como emplear técnicas especiales para asegurar el éxito de la plantación, como el uso de fertilizantes.

Además, para ayudar al establecimiento de la vegetación de la cárcava, se pueden acompañar estas medidas con barreras fabricadas con materiales de origen natural, tales como ramas (palizadas, fajinas, zarzos, etc.), troncos o piedras (muretes de reconstrucción, bancales, etc.), que serán de carácter temporal, a no ser que el estado de la cuenca requiera la instalación de estructuras permanentes. O bien aplicando una técnica más reciente como geotextiles, que igualmente ayudan al asentamiento de la vegetación en laderas degradadas. Los estudios realizados por Navarro *et al.* (1997) demuestran el éxito de los geotextiles orgánicos combinados con la revegetación, ya que concluyen que, una vez aplicados, ofrecen un recubrimiento del 100 % del suelo tratado; si bien, debido a su alto coste, aconsejan su empleo en cárcavas que afecten a terrenos productivos, ecosistemas singulares, obras civiles o la calidad de las aguas.

Estructuras temporales para el control de cárcavas

Las estructuras temporales sirven de protección transitoria, para dar tiempo y facilitar la implantación y el arraigo de la vegetación. Retienen la tierra fértil y la humedad y pueden consistir en (Hudson, 1982; FAO, 2000; Sharma, 1993):

- Barreras de piedras sueltas, que se emplean cuando la pendiente del lecho es moderada, y el área de drenaje es pequeño o moderado, y cuando en la zona se encuentran abundantes piedras.
- Barreras de piedras con malla metálica, con las mismas características y en las mismas condiciones que el anterior, sólo que las piedras van sujetas con una malla de alambre.
- Presas de red: postes metálicos clavados en el lecho que sujetan una red metálica, sobre la cual se aplica paja y broza suelta para constituir una barrera porosa.
- Barreras de ramas secas, apiladas o amarradas entre filas de estacas verticales. Deben estar lo suficientemente enterradas para que no se desmoronen. Se emplean cuando el área de drenaje es de pequeño tamaño.
- Barreras de troncos, formando un entramado más firme que en el caso anterior. Se emplean cuando la carga es violenta y en altura, por ejemplo en la cabecera de la cárcava. Aquí pueden incluirse los pequeños diques de troncos propuestos por Cantero (2011).
- Barreras de adobe, que pueden fabricarse con el propio terreno del lecho de la cárcava.

Estructuras permanentes para el control de cárcavas

Las estructuras permanentes se emplean cuando el problema de la erosión por cárcavas es de mayor envergadura, cuando ya no son eficaces las estructuras temporales, y su principal objetivo es resistir las avenidas torrenciales por tiempo indefinido.

Hudson (1982) agrupa las distintas estructuras de carácter permanente según la función a la que estén destinadas. De esta forma, si se pretende evitar el avance de la cabecera de las cárcavas que puede llegar a producir problemas de derrumbamiento en puentes, carreteras o edificios, se pueden construir un dique en la cabecera de la cárcava, que se

encontrará inundado continuamente si se ha dejado un espacio libre entre la estructura y la cabecera. También se puede llegar a conseguir estabilizar la cabecera de la cárcava empleando las estructuras de obra de fábrica o de hormigón que Hudson (1982) denomina “estructuras de pendiente”, y que ocasionan un daño menor.

Pero si la función que se pretende que realicen estas estructuras es regular el impacto de la crecida, se acude a la construcción de diques de regulación, que poseen un vertedero abierto, cuyo funcionamiento consiste en la recogida del agua de una tormenta y su desagüe para la próxima crecida.

Por último, cuando el fin de estas construcciones sea la retención de sedimentos, y las anteriores soluciones no sean válidas debido a una excesiva carga de estas partículas, se acude a presas permanentes que retienen los aluviones.

Los materiales son variados: desde estructuras reticulares de madera, perfiles o jaulas metálicas rellenas de cascajo o piedra a estructuras de mampostería seca, mampostería hidráulica, hormigón en masa, hormigón armado, presas de tierra, de otros materiales reciclados como neumáticos, bidones o contenedores, etc. Si se realizan con hormigón o mampostería hidráulica se diseñan una serie de mechinales o troneras que atraviesan su perfil y permiten la salida regulada del caudal líquido, a la vez que disminuyen las fuerzas de empuje y contribuyen a la estabilidad de la obra.

LAS RESTAURACIONES HIDROLÓGICO-FORESTALES CON CONSTRUCCIONES CIVILES

La restauración hidrológico-forestal comprende el conjunto de planes, trabajos y acciones necesarias para la conservación, defensa y recuperación de la estabilidad y fertilidad de los suelos, la regulación de escorrentías, la consolidación de cauces fluviales y laderas, la contención de sedimentos y acarreos y, en general, la defensa del suelo contra la erosión (Ferrer, 2009).

La realización de estos trabajos de restauración se remonta a mediados del siglo XIX, y nace en Europa con el fin de dar una solución a la deforestación que estaban sufriendo sus territorios montañosos, debido a cortas abusivas, roturaciones del terreno o explotaciones indiscriminadas, entre otras, y sometidos a aludes en invierno y deshielos en primavera, así como a las lluvias torrenciales en zonas mediterráneas, que originaban inundaciones y avenidas, con sus consecuentes efectos negativos. Así, se llevaron a cabo trabajos de restauración en zonas montañosas en Suiza (1848), Francia (1882), Austria (1884) y España (1888) (Thiéry & Lechallas, 1891; Codorníu, 1897, 1898; Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

Las causas que motivaron que en 1888 se llevara a cabo la primera restauración forestal en nuestro país fueron las catástrofes del Júcar en 1864, y del Guadalentín y el Almanzora en 1879. Esta restauración se materializó en el “Plan sistemático de repoblación de cabeceras de cuencas hidrográficas”, que comprendía a las cuencas del río Júcar, del río Segura, del río Lozoya, y de las dunas de Cádiz y Huelva. En ese mismo año se promulgó un Real Decreto que hacía referencia a la organización de los trabajos de repoblación en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de España (Mintegui & Robredo, 1994; Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

En 1901 se crea el Servicio Hidrológico-Forestal de la Nación, que abarca las principales cuencas hidrográficas del territorio español mediante su distribución en diez Divisiones Hidrológico-Forestales. A través del Real Decreto de 7 de junio de 1901 se crearon los Servicios Hidrológico-Forestales, responsables de las extensas zonas arboladas que actualmente pueblan nuestra península. De esta manera, se comienza a unir en la práctica lo hidrológico y lo forestal, denominación bien acertada que da una idea de la importancia que tiene el bosque en el ciclo hidrológico. En estos principios del siglo XX se realizan restauraciones emblemáticas en sierra Espuña (Codorníu, 1910), en Canfranc y en la cuenca del Lozoya, entre otras (Mintegui & Robredo, 1994; Martínez García *et al.*, 1996; Del Palacio, 1999; Ferrer, 2009).

Posteriormente, en 1926 se crean las Confederaciones Hidrográficas, que también tenían competencias en este campo. Las Divisiones Hidrológico-Forestales siguen trabajando hasta que son absorbidas en 1952 por el Patrimonio Forestal del Estado, y finalmente desaparecen en 1968, asumiendo sus funciones los Servicios Hidrológico-Forestales provinciales. Estos servicios pasan a depender del Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) cuando se crea este organismo en sustitución del Patrimonio Forestal, en 1971 (Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

Con la creación de las Comunidades Autónomas, en 1984 éstas asumen las competencias en restauración hidrológico-forestal, si bien de forma compartida con la administración estatal, a través de convenios entre las Comunidades Autónomas y el Ministerio de Medio Ambiente. Así, en 1985 se firmaron convenios entre las Comunidades Autónomas y el ICONA, que tenían con objeto la restauración hidrológico-forestal de cuencas; y a partir 1986, con la entrada de nuestro país en la Unión Europea, los convenios establecidos con ésta han servido para transferir y canalizar los fondos europeos, como el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), que se aplica desde las Confederaciones Hidrográficas, o el Fondo Europeo de Orientación y Garantía Agrícola (FEOGA) (Del Palacio, 1999; Gil, 2004; MMAMRM, 2011). En este marco, se han llevado a cabo una serie de actuaciones en materia de restauración hidrológico-forestal, a través de la actual Dirección General de Medio Natural y Política Forestal del Ministerio de Medio Ambiente, que incluyen repoblaciones forestales con especies del máximo valor ecológico posible dentro de las condiciones de clima, topografía y suelo, y obras de corrección de cauces torrenciales y ramblas como acciones de defensa activa inmediata para disminuir arrastres y acarreos sólidos, impidiendo su incorporación a los cauces fluviales y a la red de embalses. Gracias a estas ayudas, son muchas las restauraciones hidrológico-forestales llevadas a cabo en nuestro país. Los trabajos realizados en las cuencas de los torrentes de cabecera de los ríos Aragón, Gallego, Noguera Ribagorzana o Noguera Pallaresa en la cornisa pirenaica, en las cuencas de las ramblas de los ríos Guadalmedina, Almanzora y Oria, en las cuencas de los ríos Jalón y Jiloca y en la Cuenca Hidrográfica del río Segura, en las torrenciales ramblas levantinas, o las actuaciones llevadas a cabo en el Valle del Lozoya, Sierra Espuña o Sierra Nevada, son algunos ejemplos de restauraciones hidrológico-forestales en España (Codorníu, 1910; Pérez-Urruti, 1948; Del Palacio, 2002; Gil, 2004).

En el presente, la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, modificada por la Ley 10/2006, de 28 de abril, atribuye al actualmente denominado Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente las actuaciones de restauración hidrológico-forestal, junto

con los trabajos de conservación de suelos y lucha contra la desertificación, si bien, de acuerdo con el ordenamiento jurídico, realiza estas actividades en colaboración con las Comunidades Autónomas. A través de la Ley de Montes se aprueba el Plan Nacional de Actuaciones Prioritarias de Restauración Hidrológico-Forestal, que preveía la identificación y diagnóstico, por subcuencas, de los procesos erosivos, su intensidad y el riesgo para las poblaciones, cultivos e infraestructuras, a través de la definición de zonas prioritarias de actuación.

Objetivos de la restauración hidrológico-forestal.

Mintegui & Robredo (1994) clasifican los objetivos de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica en tres grupos:

- La retención de suelo mediante el control de la erosión
- La regulación de las avenidas y el transporte de sedimentos que éstas provocan, así como su sedimentación.
- La provisión hídrica.

Estos mismos objetivos quedan reflejados en el esquema de una restauración hidrológico-forestal (figura 1) propuesto por Gil (2004), que comprende dos partes:

- El estudio descriptivo de la cuenca hidrográfica, que incluye el estudio del relieve, la red de drenaje, la vegetación y el suelo (parte izquierda).
- El análisis de los datos pluviométricos que culminan en la obtención de los caudales punta asociados a los distintos periodos de retorno (parte derecha).

Estas dos partes confluyen en un mismo punto cuando es necesario llevar a cabo actuaciones en las laderas y en los cauces de la cuenca estudiada. Y para ello el autor señala la previa ordenación agrologica de la cuenca y la selección de alternativas a desarrollar, para finalmente llegar a la descripción, justificación y cálculo de los trabajos que conforman el proyecto de restauración hidrológico-forestal.

Por tanto, para poder establecer las bases o principios que deben regir las actuaciones correctoras englobadas dentro de lo que se denomina restauración hidrológico-forestal de cuencas se debe partir del fenómeno torrencial, caracterizado por precipitaciones de gran intensidad que generan crecidas violentas y súbitas, que provocan la circulación por los cauces de caudales sólidos (materiales en suspensión o acarreos), y que es consecuencia de los procesos erosivos de una cuenca (López-Cadenas, 2003).

La corrección del fenómeno torrencial se basa en la comparación entre la capacidad de arrastre del caudal y la resistencia a ser arrastrados de los materiales del lecho afectados. La primera, denominada tensión tractiva, es función del peso específico del agua (γ), de la pendiente (l) y del radio hidráulico (R_h); y la segunda, llamada tensión límite de arrastre o tensión crítica, es función del diámetro característico de los materiales (d_{50}), de la diferencia entre el peso específico de los materiales y del agua ($\gamma_s - \gamma$), y de un coeficiente K . Si en una sección del cauce la tensión tractiva es superior a la tensión límite de arrastre se producirán fenómenos de erosión, con lo que las actuaciones de restauración hidrológico-forestal irán encaminadas a reducir los parámetros de los que depende la tensión tractiva o a incrementar la tensión límite de arrastre (Del Palacio, 1999; López-Cadenas, 2003).

El proceso de corrección de cauces torrenciales consiste en el establecimiento de diversas obras destinadas a la estabilización de los cauces, para regular total o parcialmente los efectos de la dinámica de los caudales circulantes, y que producen en sus orillas y fondo procesos de erosión, transporte y sedimentación de los materiales que lo forman. Así mismo, se intenta evitar la incorporación de caudales sólidos a la corriente, actuando sobre las laderas de la cuenca vertiente (Del Palacio, 1999). En la tabla 2 se muestran las actuaciones que componen la corrección de un sistema torrencial, indicando sus respectivos objetivos.

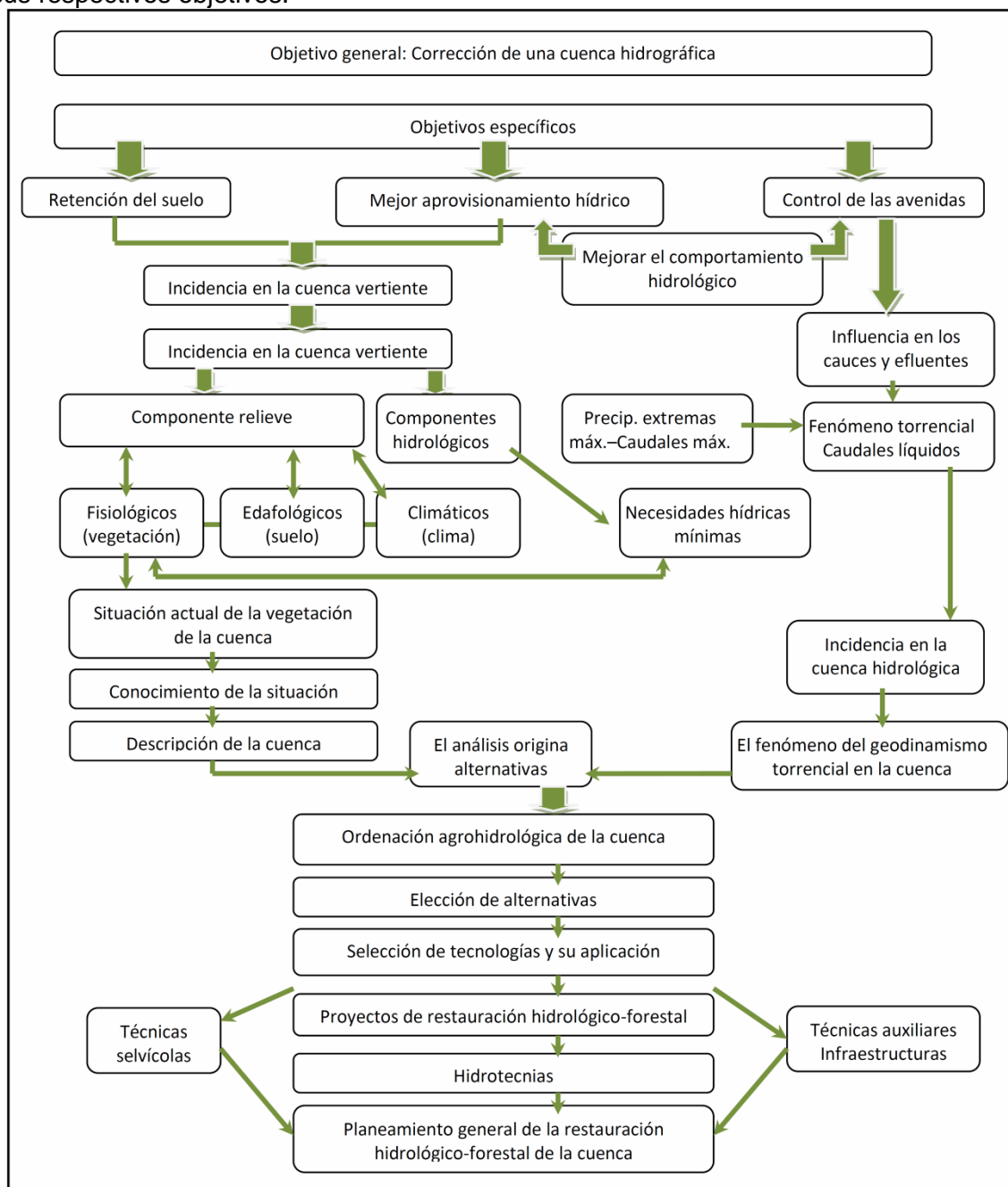


Figura 1. Esquema de la restauración hidrológico-forestal de cuencas, según Gil (2004).

Tabla 2. Actuaciones de corrección de una cuenca torrencial (modificado de Del Palacio, 1999).

LOCALIZACIÓN		ACCIONES		OBJETIVOS	
		TIPOS			
En la cuenca		Acciones biológicas	Repoblación forestal Mejora de cubiertas vegetales Tratamientos selvícolas	Control de erosión laminar y en regueros Mejora de la infiltración Control de escorrentías directas	
		Prácticas de conservación de suelos	Terrazas Drenajes Zanjas de infiltración Microcuencas	Control de erosión laminar y en regueros Control de la humedad del suelo Control de los movimientos en masa Mejora de la disponibilidad hídrica en laderas	
		Obras de bioingeniería	Albarradas, palizadas Fajinas, etc. Muretes de reconstitución	Control de cárcavas Control de la erosión remontante Estabilidad de laderas	
En el cauce (régimen torrencial)	Área de erosión y transporte	Obras transversales	Diques de consolidación	Perfil de equilibrio o compensación Consolidación de las laderas del cauce	
			Diques de retenida	De materiales sólidos	Retención de sedimentos o acarreos Defensa de embalses, vegas... Defensa de instalaciones hidroeléctricas, infraestructuras y poblaciones
				De caudales líquidos	Laminación de la onda de avenida Recarga de acuíferos
			Umbrales de fondo	Control de erosión del lecho	
			Dispositivos Clauzel Plazoletas de depósito	Retención de acarreos Retención de acarreos y bolos	
	Área de sedimentación	Obras longitudinales	Espigones	Defensa contra erosiones laterales desviando las aguas	
			Muros de defensa	Defensa de márgenes y rectificación del eje hidráulico Defensa contra inundaciones Contención de deslizamientos en laderas	
			Revestimiento de márgenes: escolleras, cubiertas vegetales, otras estabilizaciones biotécnicas (bioingeniería)	Defensa contra erosiones laterales, aumentando la resistencia de los márgenes y/o controlando la velocidad del agua	
			Canales de desagüe Encauzamientos mediante muros longitudinales, rastrillos y solera resistente a erosión	Concentración del agua en cauce fijo y estable	
	En el cauce (régimen fluvial)	Obras longitudinales	Revestimientos y espigones, deflectores	Defensa de márgenes contra erosiones laterales, recuperación de riberas	
Malecones			Defensa contra inundaciones y rectificación del eje hidráulico		

Las repoblaciones forestales en la restauración hidrológico-forestal

La restauración hidrológico-forestal de cuencas integra un conjunto de acciones de mejora de la cubierta vegetal de las laderas y obras de ingeniería hidráulica que se desarrollan en los cauces. La restauración de la vegetación es el primer paso para conseguir la restauración hidrológico-forestal de una cuenca.

La cubierta vegetal de un lugar contribuye al control de las escorrentías directas y de la erosión superficial, estabilizando la cuenca frente al fenómeno torrencial. Por ello, la restauración de la vegetación y el mantenimiento de las cubiertas vegetales en buen estado producen (Mintegui & Robredo, 1994; Del Palacio, 1999; Soto, 2008):

- Eliminación de sedimentos en suspensión, disminuyendo la tensión tractiva de la corriente.
- Aumento de la tensión límite de arrastre de los bordes de los cauces.
- Reducción de los caudales punta circulantes, al interceptar la lluvia e incrementar la infiltración del suelo.
- Disminución del radio hidráulico de las secciones y, en consecuencia, de la tensión tractiva de los caudales.
- Además, aumento de la rugosidad del cauce lo que frena la velocidad de la corriente e incrementa los tiempos de concentración de las cuencas

Las peculiaridades de los terrenos en los que se realizan este tipo de actuaciones repobladoras acarrea una serie de dificultades, debido a que suelen tener fuertes pendientes, climas extremos y con precipitaciones irregulares pero intensas, en algunos casos escasas, y son suelos con alto grado de degradación. Estos inconvenientes generan limitaciones en cuanto a la elección de la especie, obligando a inclinarse hacia especies de temperamento heliófilo, por las fuertes insolaciones que tienen que soportar en las etapas iniciales, xerófilas y frugales. Por estas razones, las especies elegidas suelen ser del género *Pinus*. Dentro de este género, el pino carrasco (*Pinus halepensis*) ha sido ampliamente utilizado en repoblaciones en el sureste español (Maestre *et al.*, 2004). Este tipo de especies a su vez permitirán el establecimiento de especies más exigentes, como las del género *Quercus*, bien como acompañantes en la repoblación, o bien en una segunda fase de restauración hidrológico-forestal (Del Palacio, 1999). Ejemplos del empleo de esta combinación de géneros *Pinus-Quercus* son las repoblaciones del monte El Valle y Carrascoy en 1983, la restauración hidrológico-forestal realizada en 1907 para la corrección de la cuenca del torrente de Arás en Huesca, la realizada en 2003 para la restauración de la cuenca del Río Jarama en la Puebla de Valles en Guadalajara, las actuaciones desarrolladas en la Rambla de la Ortigosa en la provincia de Albacete (Martínez-Casasnovas, 1992; Del Palacio, 1999; Gil, 2004; Rodríguez Graells, 2011), o la restauración hidrológico-forestal proyectada para la corrección de los torrentes de Canfranc con *Pinus sylvestris* como especie principal y *Fagus sylvatica* en las zonas más sombrías (Ayerbe, 1913); también en la corrección de las cárcavas del río Carrión (Palencia) Saldaña, se empleó *Pinus sylvestris* pero diversas frondosas en las vaguadas (Navarro *et al.*, 2012) (figura 2).



Figura 2. Restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). Izquierda: cárcavas y dique de retención en 1930 (Archivo de Confederación Hidrográfica del Duero); derecha: cárcavas en junio de 2010

Las obras civiles en la restauración hidrológico-forestal

Para corregir y estabilizar los cauces torrenciales se pueden proyectar diversas hidrotecnias, que pueden ser longitudinales, que actúan en los márgenes del cauce, o transversales, que producen sus efectos más significativos en el lecho del cauce.

Las obras longitudinales no se pueden considerar como solución única para corregir el estado torrencial de un cauce, sino que son complementarias a las obras transversales, y su objetivo es la defensa contra la erosión lateral, contra los deslizamientos o contra las inundaciones. En la tabla 3 se pueden observar las principales obras transversales, según la función que desempeñen (Del Palacio, 1999).

Por otro lado, las obras transversales ofrecen la solución más sencilla y la más empleada para la corrección de cauces torrenciales. Los principales efectos de este tipo de construcciones son (op. cit.):

- Establecen un punto fijo en el lecho del cauce, controlando su descenso progresivo.
- Provocan el depósito de los sedimentos más gruesos en el vaso de embalse antes de que se aterre.
- El aterramiento progresivo eleva el cauce hasta alcanzar la pendiente de compensación, menor que la del cauce natural.
- Generan mayores anchuras de cauce, que junto con la menor pendiente, logra una disminución de velocidad y de la capacidad de erosión.
- Producen la estabilización de las laderas, debido al aterramiento.

Estas obras transversales son principalmente los diques forestales, y se clasifican en dos grupos, los diques de consolidación y los de retenida. Los diques de consolidación se utilizan para evitar los fenómenos directos de erosión en los cauces y en las laderas marginales afectadas de inestabilidad. Con ellos se consigue la fijación del perfil longitudinal, mediante la gradación del cauce con diques consecutivos, que dotan al torrente de la pendiente más estable de los aterramientos en forma de escalones. Sin embargo, los diques de retenida sirven para retener materiales sólidos y líquidos. Son obras complementarias, necesarias para evitar daños por acarreos y caudales líquidos en zonas dominadas por el torrente, y se pueden distinguir dos tipos (op. cit.):

- Diques de retenida de materiales sólidos.- Pueden ser diques cerrados, que retienen todos los materiales, o semihuecos, que realizan una retenida selectiva, ya que sólo retienen materiales de gran tamaño.
- Diques de retención de caudales líquidos.- Incluyen los diques de laminación, cuyo objetivo es disminuir los caudales punta, y los diques de recarga de acuíferos, que tratan de embalsar agua para que se infiltre hasta el acuífero.

Tabla 3. Tipos de obras longitudinales (Del Palacio, 1999).

Obras de defensa contra erosiones laterales	Se aplican principalmente en los tramos de garganta y en las zonas inferiores de las ramblas donde son frecuentes erosiones laterales discontinuas en puntos concretos del cauce	Espigones	Estructuras sumergibles, que se apoyan o empotran en la orilla, perpendiculares al flujo o divergentes a contracorriente. Defienden las orillas, obligando al curso de agua a seguir una curva más suave y no erosiva
		Malecones o muros de defensa	De hormigón o mampostería hidráulica o gavionada, protegen directamente a las márgenes frente a erosiones laterales y regulan la sección del cauce
		Escolleras	Sencillas y económicas, recubren con materiales sueltos (grandes piedras o bloques) los taludes y orillas sometidos a erosión. Puede plantarse con especies arbustivas, y hacerse de enrejados metálicos o gaviones
Obras para la contención de deslizamientos de laderas	Normalmente se construyen muros de altura suficiente en la base de las laderas de los torrentes.		
Obras de defensa para evitar inundaciones (encauzamientos)	Consisten en la construcción de dos malecones, uno en cada orilla, para regularizar y consolidar las márgenes del cauce, definiendo una sección con capacidad de desagüe suficiente para evacuar avenidas de elevado periodo de retorno	Encauzamiento naturalizado con lecho no erosionable	Empleando materiales de revestimiento de lecho y márgenes que resistan la tensión de arrastre de los máximos caudales, siendo recomendable disponer a intervalos regulares de unos rastrillos de fondo transversales
		Encauzamiento escalonado en tramos erosionables sobre lecho natural	Formado por muros cajeros resistentes y pequeños diques transversales o rastrillos, que escalonan la descarga y reducen la velocidad de flujo
		Encauzamiento con canal rápido y solera resistente	Canales de obra de fábrica muy resistente, en las que se concilian la suficiencia de la sección con la pendiente y la rugosidad de la solera, para que no se produzcan velocidades inadmisibles

Los diques de retención de sedimentos

Un dique puede ser definido como una estructura transversal construida a través de un cauce con la intención de mitigar y reducir la erosión de su lecho y sus laderas (Hudson, 1982; Morgan, 1997; Chanson, 2004; Zeng *et al.*, 2009). En Europa el empleo de este tipo de estructuras se remonta al siglo XVI, momento en el que fueron empleados en los Alpes, y se hicieron populares en el siglo XIX. En China se construyeron por primera vez también en el siglo XVI en la meseta de Loess, y han sido utilizados con frecuencia desde el siglo XX (Xu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006; Zeng *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2009). En España, la construcción de diques ha sido una técnica muy frecuentemente empleada en los planes y programas de restauración hidrológico-forestal (Del Palacio, 1999; Varela, 1999; Martínez de Azagra *et al.*, 2002; Gil, 2004), principalmente en Pirineos y en el sureste de la Península Ibérica (Martínez-Lloris *et al.*, 2001; Conesa, 2004; Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Martínez-Lloris, 2006; Romero *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2007; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2008; Conesa & García, 2009; Conesa *et al.*, 2009). En las zonas semiáridas, en las que la degradación de la cubierta vegetal y la torrencialidad de las precipitaciones originan procesos erosivos que dañan gravemente al suelo, el empleo de esta técnica es especialmente importante y necesario.

Sin embargo, algunos autores consideran que los diques de retención de sedimentos no siempre resultan necesarios ni efectivos (Marston & Dolan, 1999; Romero, 2008). García-Ruiz *et al.* (1996) y Götz (2001) analizan los riesgos que entrañan estas obras de corrección, sobre todo en áreas especialmente vulnerables, y Wohl (2006) indica que los diques producen los siguientes efectos negativos:

- Alteran la dinámica de los sedimentos
- Alteran la estabilidad del sustrato y lecho del cauce
- Interrumpe el movimiento longitudinal de nutrientes y organismos acuáticos
- Alteran la frecuencia de las olas de las inundaciones

Las entradas a la presa inducen importantes efectos morfológicos y granulométricos en el lecho del río (Boix-Fayos *et al.*, 2007), que cambia el comportamiento hidráulico del flujo en eventos de gran intensidad (Conesa *et al.*, 2004). Por tanto, será necesario el estudio de cada caso para determinar la necesidad de su empleo para la consecución del efecto deseado, y considerar si éste se pudiera lograr únicamente con vegetación. Castillo *et al.* (2008) concluyen que, a largo plazo, los usos del suelo ejercen un mayor control de la producción de sedimentos que las obras hidráulicas, que son menos eficientes con el aumento de la cobertura vegetal. No obstante, ambas técnicas pueden alterar el régimen hidrológico del cauce y su morfología, de forma que pueden llegar a causar impactos tan negativos que lleguen a anular los efectos beneficiosos conseguidos con la ejecución de estas obras (Castillo *et al.*, 2007; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2008). Por tanto, según estos autores, en el corto plazo, los diques tienen efectos positivos para el control de los sedimentos, pero debe considerarse como una medida temporal, que debe ser acompañada con actuaciones de repoblación con especies que ayuden a conseguir un control a largo plazo. De hecho, esta combinación de actuaciones tiene efectos positivos sobre la vegetación ribereña de acuerdo con Bombino *et al.* (2006), que encuentran una diversificación longitudinal de los tipos de vegetación y la creación de nuevos hábitats para las comunidades biológicas y ecológicas, que se atribuye a las características geométricas de este tipo de construcciones.

Funciones de los diques de retención de sedimentos

Las funciones que cumplen estas estructuras transversales y que justifican su empleo son múltiples, y han sido reseñadas por varios autores:

- Controlar el transporte de sedimentos, en condiciones generales así como en aquellos casos en que se encuentren asociados con el flujo de escombros y carga pesada durante las grandes inundaciones (Catella *et al.*, 2005).
- Estabilizar las laderas y cauces torrenciales, como barranqueras, barrancos, torrentes, ramblas, ramblizos o cárcavas. Consolidar las laderas inestables gracias a la cuña de materiales aguas arriba del dique, que se interpone entre las dos laderas, impidiendo los movimientos en masa: deslizamientos de fondo, socavación o hundimientos (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007; Romero, 2008).
- Capturar, controlar, retener y disminuir el aporte de material sólido (Conesa, 2004; Belmonte *et al.*, 2005; Conesa & García, 2007; Romero, 2008).
- Laminar las aguas de avenida (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007).
- Recargar los acuíferos, favorecido por el almacenamiento de agua en el vaso y el aumento de la carga hidrostática (Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007).
- Disminuir la velocidad del agua y por tanto su capacidad erosiva (Belmonte *et al.*, 2005; Romero, 2008).
- Retrasar el aterramiento de embalses y alargar su vida útil, al reducir la tasa de materiales que serían vertidos en el vaso del embalse (Gil, 2004; Belmonte *et al.*, 2005; Romero, 2008). En las cuencas hidrográficas mediterráneas y del Guadalquivir la pérdida de capacidad de los embalses se estimó entre el 5 y el 25 % (Avendaño & Cobo, 1997; Saavedra, 2003). Este aspecto es especialmente importante en España, ya que es el primer país europeo y cuarto del mundo en número de embalses (Romero, 2008).
- Controlar aludes, mediante su retención completa o parcial, evitando que se vean afectadas vías de comunicación, poblaciones o estaciones de esquí (Gil, 2004).

Efectos de los diques de retención de sedimentos

Los diques empleados en los proyectos de restauración hidrológico-forestal pueden producir efectos hidrológicos y geomorfológicos sobre la corriente y efectos sobre infraestructuras, que han sido señalados por multitud de autores (Chien, 1985; López Cadenas, 1988; Castillo *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil, 2004).

Los efectos sobre el comportamiento hidráulico de la corriente difieren aguas arriba y aguas abajo de la hidrotecnia. Aguas arriba, estas estructuras provocan un descenso de la energía cinética del flujo de agua y de su capacidad de transporte, que induce la deposición de los sedimentos, produciéndose un cambio local del perfil del río, con disminución de la pendiente y ensanchamiento de la sección, y con un progresivo aterramiento del vaso con enterramiento de barras antiguas, con la consecuente elevación del lecho del cauce. De esta forma, producen una estabilización del canal, y originan dispersión de canales, e incluso un almacenamiento de agua, transitoriamente, de forma que se reducen los caudales punta; o de forma permanente, favoreciendo la

recarga de acuíferos (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985; Castillo *et al.*, 2001; Gil, 2004; Castillo *et al.*, 2007). Al disminuir la pendiente, además, en el extremo del área de influencia de la presa, se produce una deposición caótica de cantos heterométricos. En esta deposición, los sedimentos se organizan por tamaños, tendiendo a la simplificación sedimentaria que se va prolongando hacia arriba (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985). Romero *et al.* (2007) han obtenido un valor medio de control de erosión en cuencas con diques en Murcia de $4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, lo cual es una referencia del efecto de retención mínimo que realizan estas estructuras; también Díaz-Gutiérrez *et al.* (2012) ha observado que se pueden retener $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en diques de las cárcavas de Tórtoles, en la cuenca del río Corneja, en Ávila (figura 3); y Ramos *et al.* (2012) han obtenido cifras dentro de este rango de magnitud en los diques de Saldaña, junto al río Carrión, en Palencia. Estas cifras no son nada desdeñables a la hora de analizar el efecto beneficioso de estas obras hacia las infraestructuras y poblaciones aguas abajo de las mismas, así como en la protección de la calidad del agua y el hábitat acuático.



Figura 3. Restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila). Izquierda: barrancos y cárcavas en 1964 (Archivo de Confederación Hidrográfica del Duero); derecha: dique en un barranco en 2009

Aguas abajo los efectos de estas hidrotecnias son más complejos. Según algunos autores (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985; Bull *et al.*, 2000; Castillo *et al.*, 2001), la retención de sedimentos aguas arriba de la estructura provoca que el flujo recupere parte de su energía cinética original, que ya no emplea en arrastrar sedimentos, por lo que tiene una gran capacidad de incisión y una mayor capacidad erosiva, de forma que la excavación del nivel de base induce un incremento y una reactivación de los procesos de erosión. Además, se produce una modificación de la morfología de los cauces (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985; Romero *et al.*, 2003), que pueden indicar que la erosión se ve incrementada aguas abajo de la presa, produciendo cambios en el transporte y en la descarga de sedimentos. Esta última, en función de su intensidad, puede alterar la forma de la sección transversal del cauce, su pendiente y el tamaño de grano del material del lecho (Brandt, 2000; Castillo *et al.*, 2007). Sin embargo, a este respecto hay que decir que el peso específico del agua con sedimentos es de unos $1.200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que el del agua pura es de $1.000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, por lo que evidentemente la energía cinética del agua pura es menor que la cargada de materiales. Por lo tanto, la erosión a la que se refieren los autores señalados, es posible que sea debida a un defecto en el diseño de la

estructura, en cuanto a la falta de disipadores de energía, cuencos de amortiguación o zampeados, y no a causa del flujo hidráulico. Estos elementos deben acompañar siempre el cuerpo central de la obra para evitar efectos indeseados.

Sobre las infraestructuras, los diques, aparte de ocasionar una prolongación de la vida útil de los embalses, sirven de defensa de puentes, drenajes y encauzamientos desde una doble perspectiva: los diques situados aguas arriba de estas infraestructuras ayudan a mantener su operatividad para el rango de caudales para el que fueran diseñadas, ya que, al provocar la sedimentación, evitan la acumulación de materiales arrastrados por el flujo, que producirían la reducción de la sección efectiva del canal; los diques situados aguas abajo, sin embargo, evitan que se descalce la cimentación de estas obras, gracias al aterramiento del vaso que producen (Gil, 2004).

Por otra parte, Gil (2004) indica que los diques alteran la geomorfología de barrancos, torrentes y ramblas, por lo que a la hora de diseñarlos es necesario tenerlo en cuenta para que los efectos negativos sean los mínimos posibles. No obstante, hay que considerar la distinta repercusión de estas hidrotecnias en corrientes naturales y en zona de *badlands* o torrentes generados por una acción antrópica descontrolada. En este último caso, los diques intentan recuperar una morfología más parecida a la original antes de la intervención humana y al menos, si no es posible, disminuir la capacidad erosiva de los flujos torrenciales creados y reducir el elevado transporte de sedimentos, con lo que sus efectos serían positivos. Por otra parte, si se construyen estas hidrotecnias sobre cauces con flujos permanentes o casi permanentes, se debe tener en cuenta a la fauna acuática que los utiliza, y por lo tanto adoptar las medidas oportunas para que no se vea afectado su desplazamiento longitudinal. A este respecto, también conviene señalar que muchas de estas obras llevan distribuidas en el paramento a diferentes alturas mecinales y/o troneras, que en cierta medida pueden facilitar el paso de fauna acuática a su través con diferentes niveles de avenidas.

Por último, los efectos de la retención de sedimentos y laminación de avenidas anteriormente señalados, conducen a una reducción de los riesgos de inundación de los núcleos de población que se sitúan aguas abajo de estas estructuras, de acuerdo con Gil (2004). Sin embargo, en ocasiones inducen una falsa idea de seguridad absoluta, y aparecen usos inadecuados en los cauces o en los conos de deyección, como en el caso de la catástrofe del torrente de Arás en Biescas (Huesca), viviendas al pie de las cárcavas como en Saldaña (Palencia), o casas apoyadas en diques, como ocurre en Tórtoles (Ávila) (figura 4).



Figura 4. Izquierda: Construcción empotrada en un dique de gaviones en Tórtoles (Ávila). Derecha: Vivienda construida al pie de una cárcava en Saldaña (Palencia).

CONCLUSIONES

El problema de la erosión por cárcavas y *badlands* es arduo, complejo y de costosa remediación. Hay que estabilizar laderas para poder revegetar y reforestar el terreno, evitar tubificaciones, controlar escorrentías así como caudales líquidos y sólidos, disipar la energía de los flujos erosivos y asegurar el arraigo de la vegetación implantada. Todo ello se analiza, estudia, calcula y planifica en un proyecto de restauración hidrológico-forestal elaborado por los ingenieros forestales y de montes, que son los técnicos con la formación y competencia profesional en la materia. Este proyecto luego debe ser ejecutado con las complicaciones que se presentan sobre terrenos tan difíciles y climas tan irregulares (arcillas expansivas, deslizamientos de laderas, accesos a los terrenos, problemas de cimentación o anclaje de estructuras, falta de lluvias, crecidas súbitas, etc.). El análisis de la efectividad de las obras y los resultados deben entonces someterse a crítica asegurando que las condiciones de ejecución han sido las correctas. En ocasiones la falta de presupuestos apropiados a la envergadura de las obras, las sequías, la infertilidad del suelo, la calidad de la planta, la carencia de mano de obra especializada, la falta de control en el desarrollo de los trabajos y, muchísimas veces, la falta de seguimiento y mantenimiento de las acciones proyectadas pueden llevarnos a falsas conclusiones sobre los resultados. Un estudio serio y riguroso debe considerar tanto el diseño de los proyectos como su ejecución, analizar las variables climáticas, hidráulicas y humanas relacionadas con las obras y aquéllas para las que estaban diseñadas. Y por supuesto, no perder nunca de vista el objeto para el que fueron proyectadas: normalmente la defensa de poblaciones, propiedades e infraestructuras. Sólo así se podrá avanzar en el conocimiento y la mejora de los proyectos y actuaciones. No obstante, la ingeniería forestal ha dejado desde finales del siglo XIX claros ejemplos de lo que supone robar terrenos al desierto y devolverlos a su vocación forestal. Los torrentes pirenaicos, de la cuenca del Jalón y del Jiloca, los torrentes rambla levantinos, las restauraciones de Sierra Ricote y Sierra Espuña, la fijación de dunas en Guardamar de Segura, las restauración de cárcavas de Daroca, las del río Carrión o de la cabecera del río Corneja forman parte de un gran elenco. Se trata ahora, como entonces, de frenar los procesos desertificadores y recuperar la fertilidad y productividad de los terrenos, regular el ciclo hidrológico y mejorar la calidad de las aguas para incrementar la riqueza de un país con un grave porcentaje de su territorio seriamente degradado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso, C.; 2005. Desertificación: problemática y soluciones. *Ambienta*, 47: 22 – 25.
- Ayerbe, B.; 1913. El problema del Cuerpo de Ingenieros de Montes en la defensa de la estación y vía internacional del ferrocarril a Francia por Canfranc. *Revista Montes*, 871: 305-314, 350-354, 378-386 y 423-430.
- Belmonte, F.; Romero, A.; Martínez-Lloris, M.; 2005: Erosión en cauces afectados por obras de corrección hidrológica (Cuenca del Río Quípar, Murcia). *Papeles de Geografía*, 41-42: 71-83.
- Belmonte, F.; Romero, A.; Martínez-Lloris, M.; 2005. Impactos ambientales asociados a la construcción de obras de corrección hidrológica en la Cuenca del río Quípar (Sureste de España): apertura de caminos de acceso. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 31: 97-106.
- Benito, G.; Gutiérrez, M.; Sancho, C.; 1992. Erosion rates in badland areas of the central Ebro basin (NE Spain). *Catena*, 19: 269–286.
- Boix-Fayos, C.; González-Barberá, G.; López-Bermúdez, F.; Castillo, V.M.; 2007. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of The Rogativa Catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology*, 91: 103-123.
- Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; Martínez-Mena, M.; González-Barberá, G.; Castillo, V.; 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol. Process.*, 22: 4922–4935.
- Bombino, G.; Tamburino, V.; Zimbone, S.M.; 2006. Assessment of the effects of check-dams on riparian vegetation in the mediterranean environment: a methodological approach and example application. *Ecological engineering*, 27: 134-144.
- Brandt, S.A.; 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40: 375–401.
- Bull, L.J.; Kirkby, M.J.; Shannon, J.; Hooke, J.M.; 2000. The impact of rainstorms on floods in ephemeral channels in southeast Spain. *Catena*, 38(3): 191-209.
- Cantero, A.; 2011. Construcción de pequeños diques de trozas en el hayedo de Iturrigorri (Oñati, Guipúzcoa). *Montes*, 107: 17-20.
- Cantón, Y.; Domingo, F.; Solé-Benet, A.; Puigdefábregas, J.; 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 252: 65-84.
- Casalí, J.; López, J.J.; Giráldez, J.V.; 1999. Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra (España): Descripción y cuantificación. *Ingeniería del Agua*, 6(3): 251-258.
- Casalí, J.; Giménez, R. (Eds.); 2007. *Progress in gully erosion research*. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- Castillo, V.M.; Mosch, W.; González-Barbera, G.; Lopez-Bermudez, F.; 2001: Efectos de los diques de correccion hidrológico-forestal en la geomorfología de barrancos y ramblas. *III Congreso Forestal Español*. Granada.
- Castillo, V.; González-Barberá, G.; Mosch, W.; Navarro, J.A.; Conesa, C.; López-Bermúdez, F.; 2002. Seguimiento y evaluación de los efectos sobre el medio natural de la sequía y los procesos erosivos en la Región de Murcia. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, 167-233.
- Castillo, V.M.; Mosch, W.; Conesa, C.; Gonzalez-Barberá, G.; Navarro, J.A.; López-Bermúdez, F.; 2007: Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena*, 70: 416-427.

- Castillo, V.M.; Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; Martínez-Mena, M.; González-Barberá, G.; 2011. Efectos del aumento de la cubierta vegetal y los diques de corrección en la producción de sedimentos de cuencas mediterráneas. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 32: 153-157.
- Catella, M.; Paris, E.; Solari, L.; 2005. Case study: Efficiency of slit-check dams in the Mountain region of Versilia Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(3): 145-152. DOI: 10.1061/~ASCE!0733-9429~2005!131:3~145!
- Chanson, H.; 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Chien, N.; 1985. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 143-159.
- Ciccacci, S.; Galiano, M.; Roma, M.A.; Salvatore, M.C.; 2008. Morphological analysis and erosion rate evaluation in badlands of Radicofani area (Southern Tuscany-Italy). *Catena*, 74(2): 87-97.
- Clarke, M.L.; Rendell, H.M.; 2006. Process-form relationships in southern Italian badlands: erosion rates and implications for landform evolution. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31: 15-29.
- Clarke, M.L.; Rendell, H.M.; 2010. Climate-driven decrease in erosion in extant Mediterranean badlands. *Earth Surf. Process. Landforms.*, 35(11): 1281-1288.
- Clotet, N.; Gallart, F.; Sala, M.; 1987. Los badlands, características, interés teórico, dinámica y tasas de erosión. *Notes de Geografía Física*, 15-16: 28-37.
- Codorníu, R.M.; 1897, 1898. La sierra Espuña y su repoblación forestal. *Revista de Montes*, 498: 530-538, 499: 561-566 y 606-611, 501: 633-637, 502: 661-663, 512: 233-236, 513: 261-265, 297-300 y 378-380 (artículo publicado por partes).
- Codorníu, R.; 1910. *Ligera idea de los trabajos hidrológico-forestales que efectúa el Estado*. Cuerpo Nacional de Ingenieros de Montes. Inspección de Repoblaciones Forestales y Piscícolas, núm. 7. Imprenta Alemana. Madrid.
- Conesa, C.; 2004. Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. *Nimbus*, 13-14: 125-132.
- Conesa, C.; García-Lorenzo, R.; 2007. Litofacies de relleno y modelo de sedimentación de los diques de retención en el tramo inferior de la Rambla del Cárcavo (Cuenca del Segura). *Rev. C & G.*, 21(3-4): 77-100.
- Conesa, C.; Arana, R.; García-Lorenzo, R.; 2009. Variación granulométrica y mineralógica en profundidad de los sedimentos retenidos por diques. Estudio en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular. *Nimbus*, 23-24: 61-88.
- Conesa, C.; García-Lorenzo, R.; 2009. Local scour estimation at check dams in torrential streams in south east Spain. *Geogr. Ann.*, 91A(3): 159-177.
- Del Palacio, E.; 1999. *La restauración hidrológico-forestal. Gestión sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación*. O.A. Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Del Palacio, E.; 2002. *Las ramblas: los ríos invisibles. La restauración hidrológico-forestal de ramblas en el ámbito mediterráneo*. O.A. Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- De Luna, E.; Laguna, A.M.; Poesen, J.; Giráldez, J.V.; 2004. Evolución de un sistema de cárcavas activas en el sureste español. *Ingeniería del agua*, 11: 65-73.
- Desir, G.; Marín, C.; 2009. Caracterización de la erosión en áreas acaravadas de la FM. Tudela (Bárdenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2):195-213.

- Díaz-Gutiérrez, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2012. Efectividad de los diques forestales en la retención de sedimentos en la cabecera del río Corneja (Ávila). Propuesta metodológica. (Pendiente de aceptación).
- Ellison, W.D; 1947. Soil Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 12: 479-84.
- FAO; 1981. *World soil charter*. Food and Agriculture Organization. Roma.
- FAO; 1992. *Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Boletín de suelos de la FAO. FAO.
- FAO; 2000. *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Boletín de aguas y tierras de la FAO. FAO.
- Faulkner, H.; Alexander, R.; Zukowskyj, P.; 2008. Slope-channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatán catchment badlands, Southeast Spain. *Earth Surf. Process. Landforms*, 33: 1242-1260
- Faustino, J.; 1985. CATIE. *Proyecto regional de manejo de cuencas. Conservación de suelos*. Curso de capacitación. Panamá.
- FEDERACAFÉ; 1975. *Manual de conservación de suelos de ladera*. Centro Nacional de Investigaciones del Café, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná (Colombia).
- Ferrer, M.; 2009. La restauración hidrológico-forestal. *Foresta*, 43: 181-185.
- Foster, G.R.; 1986. Understanding ephemeral gully erosion. En: *Soil Conservation. Assessing the National Resources Inventory*. Vol 2: 90-125. Committee on Conservation Needs and Opportunities. Board on Agriculture. National Research Council. National Academy Press, Washington D. C.
- García-Ruiz, J.N.; Puigdefábregas, J.; 1985: Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del pirineo central. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 11: 91-102.
- García-Ruiz, J.M.; White, S.; Martí, C.; Valero, B.; Errera, M.P.; Gómez-Villar, A.; 1996. *La catástrofe del Barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio temporal*. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones científicas. Zaragoza.
- GCMD; 2011. The Global Assessment of Human Induced Soil Degradation (GLASOD) Digital Database from UNEP/GRID-Geneva. http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_GNV00018_171.html.
- Gil, R. (Coord.); 2004. Restauración hidrológico-forestal: Pasado, presente y futuro. *Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Madrid.
- Gómez, A.; Schnabel, S.; Lavado, F.; 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 55: 59-80.
- Götz, A.; 2001. *Flood protection: a common goal for federal, cantonal and municipal authorities*. Federal Office for Water and Geology.
- Hooke, J.M.; 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79: 311-335.
- Hooke, J.; Van Wesemael, B.; Torri, D.; Castillo, V.; Cammeraat, E.; Poesen, J.; 2007. *Combating Land Degradation by Minimal Intervention: The Connec. Reduct. Approach*. Global Change and Desertif. Prog. Proj. No. GOCE-CT-2003-505361. Univ. of Portsmouth.
- Huang, M.; Gong, J.; Shi, Z.; Zhang, L.; 2009. River bed identification for check-dam engineering using SPOT-5 image in the HongShiMao watershed of the Loess Plateau, China. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8): 1853-1865.

- Hudson, N.W.; 1963. Gully control in Mopani Soils. *Rhodesia Agricultural Journal*, 60(1): 22-31.
- Hudson, N.; 1982. *Conservación del suelo*. Editorial REVERTÉ. Barcelona.
- Ibáñez, J.J.; Jiménez-Ballesta, R.; Conde, P.; 2003: Degradación de suelos por efecto antrópico en la región mediterránea. En: Bienes, R.; Marqués, R.J. (Eds.). *Perspectivas de la degradación del suelo*. Forum Calidad. Madrid.
- Lal, R.; Stewart, B. A.; 1995. *Soil Management, Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. Lewis Publisher CRC Press. Florida, USA.
- León, J.D.; 2005. Estrategias para el control y manejo de la erosión en cárcavas. *Cuadernos Ambientales*, 2: 88-101.
- López-Bermúdez, F.; Torcal, L.; 1986. Procesos de erosión en tunel (piping) en cuencas sedimentarias de Murcia (España). Estudio preliminar mediante difracción de rayos x y microscopio electrónico de barrido. *Papeles de Geografía Física*, 11: 7-20.
- López-Bermúdez, F.; Romero, A.; 1998. Erosión y desertificación: Implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de Geografía*, 28: 77-89.
- López-Bermúdez; 2008. *Desertificación: Preguntas y respuestas a un desafío económico, social y ambiental*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- López Cadenas, F. (Dir.); 1988. *Corrección de torrentes y estabilización de cauces*. FAO.
- López Cadenas, F.; 2003. *La ingeniería en los procesos de desertificación*. Ed. Mundi-Prensa, Tragsa. Madrid.
- Lucía, A.; Vicente, F.; Martín-Moreno, C.; Martín-Duque, J.F.; Sanz, M.A.; De Andrés, C.; Bodoque, J.M.; 2008. Procesos geomorfológicos activos en cárcavas del borde del piedemonte norte de la Sierra de Guadarrama (Provincia de Segovia, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sec. Geol.)*, 102: 47-69.
- Maestre, F.T.; Cortina, J.; Gil, F.; 2004. Repoblaciones de *Pinus halepensis* y restauración de ecosistemas en medio semiárido. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 17: 181-186.
- MMAMRM; 2008. *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.
- MMAMRM; 2011. *Restauración hidrológico-forestal*. www.marm.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/restauracion-hidrologicoforestal/default.aspx. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Marston, R.A.; Dolan, L.S.; 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial pattern of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology*, 31: 313-323.
- Martín-Duque, J.F.; 2007. *Erosión hídrica en cárcavas y barrancos de la provincia de Segovia, España*. *Geología & Yacimientos minerales*. www.aulados.net.
- Martín-Vide, J.P.; 2002. *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC. Badalona.
- Martínez de Azagra, A.; Fernández de Villarán, R.; Seseña, A.; Méndez, C.; Díez-Hernández, J.M.; Navarro, J.; Varela, J.M.; 2002. Metodología para la inventariación de diques forestales gavionados. Aplicación en la provincia de Palencia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 13: 171-181.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; 1992. Reforestación de cuencas en Murcia. En: Aranda, G. (Coord.). *Hidrología Forestal y Protección de Suelos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; Poesen, J.; 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58: 305-321.

- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; García-Hernández, D.; 2009. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedés region (Northeast Spain). *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 1927–1937.
- Martínez-García, F.; Martínez-García, J.J.; Masiá, R.; Cabanes S.; 1996. La restauración hidrológico-forestal de Sierra Espuña. *Montes*, 43: 9-11.
- Martínez-Lloris, M.; Romero, A.; Alonso-Sarría, F.; 2001. Respuesta erosiva de cuencas, corregidas mediante diques de retención de sedimentos, ante lluvias de alta intensidad. Cuenca del río Quípar, sureste de España. *Papeles de Geografía*, 34: 191-203.
- Martínez-Lloris, M.; 2006. *El comportamiento hidrodinámico de la cuenca del río Quípar (sureste de España). La función de los diques de corrección hidrológica* (Tesis doctoral). Universidad de Murcia. Murcia.
- Mintegui, J.A.; Robredo, J.C.; 1994. Caracterización de las cuencas hidrográficas objeto de restauración hidrológico forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del agua*, 1(2): 69-82.
- Mongil, J.; Navarro, J.; Cruz, V.; Díaz, V.; 2012. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. *IV Reunión del Grupo de Historia Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. Vitoria.
- Moore, I. D.; Burch, G.J.; Mackenzie, D. H.; 1988. Topographic Effects on the Distribution of Surface Soil Water and the location of Ephemeral Gullies. *Trans. ASAE*, 31:1098-1107.
- Morgan, R.P.C.; 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Navarro, J.; Serrano, C.; Ugalde, M.; Oria de Rueda, J.A.; Jonte, M.A.; 1997. Utilización de geotextiles en la corrección de cárcavas del Cristo del Otero (Palencia). *I Congreso Forestal Hispano-Luso*. Pamplona.
- Navarro, J.; Mongil, J.; Araújo, J.C.; 2012. Desertificación secular de las cuestas de Saldaña (Palencia) frente a 80 años de restauración. *IV Reunión del Grupo de Historia Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. Vitoria.
- Núñez, J.; 2001. *Manejo y conservación de suelos*. EUNED. San José (Costa Rica).
- Pérez-Soba, I.; 2009. Diferencias hidrológicas entre ramblas y torrentes-ramblas. *Actas 5º Congreso Forestal Español*.
- Pérez-Urruti, J.A.; 1948. *Trabajos hidrológico-forestales: fijación de terrenos*. Conferencia de clausura del Centenario de la Escuela de Ingenieros de Montes. Diana, Artes Gráficas. Madrid.
- Piest, R.F.; Bowie, A.J.; 1974. Gully and stream bank erosion. En: Land-use: persuasion of regulation. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America*. Ankeny (Iowa, EEUU).
- Poesen, J.; 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. En: *Farm Land Erosión in Temperate Plains Environment and Hills*. S. Wicherek (Ed.). Elsevier. Amsterdam.
- Poesen, J.; Govers, G.; 1990. Gully Erosión in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures. En: *Soil Erosión on Agricultural Land*. J. Boardman, I. D. L. Foster y J. A. Dearing (eds.). John Wiley & Sons. Londres.
- Poesen, J.; Hooke, J.M.; 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21 (2): 157–199.
- Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Nachtergaele, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Verstraten, G.; Van Wesemael, B.; 2002. Gully erosion in dryland environments. En: Bull, L.J.;

- Kirkby, M.J. (Eds.); 2002. *Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. Wiley. Chichester (United Kingdom).
- Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C.; 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50: 91-133.
- Porta, J.; López Acevedo, M.; Roquero, C.; 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Ramos, I.; Navarro, J.; Díaz, V.; Mongil, J.; Bartolomé, D. 2012. Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). VI Congreso Forestal. Vitoria. (Aceptada para comunicación oral)
- Regüés, D.; Guàrdia, R.; Gallart, F.; 2000. Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. *Catena*, 40: 173-187.
- Rey, F.; 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena*, 50: 549-562
- Rivera, J.H.; Sinisterra, J.A.; Calle, Z.; 2007. *Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia*. Fundación CIVAP.
- Rodríguez-Graells, C.; 2011. Planes de Conservación de Suelos en la provincia de Albacete. Repoblación y Restauración Hidrológico-Forestal. *Foresta*, 47-48: 130-139.
- Romero, A.; 2008. Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34: 83-99.
- Romero, A.; Martínez-Lloris, M.; Belmonte, F.; Hernández-Laguna, E.; 2003. La cuenca del Río Quipar (región de Murcia): Una cuenca modelo para el estudio de utilidad de los diques de retención de sedimentos en el control de la erosión y en la recarga de acuíferos. *Nimbus*, 11-12: 89-105.
- Romero, A.; Alonso-Sarria, F.; Martínez-Lloris, M.; 2007. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena*, 71: 172-178.
- Rubio, J.L.; 2005. Desertificación. *Ambienta*, 47: 26-31.
- Saavedra, M.M.; 2003: El manejo de la cubierta vegetal en el control de la erosión en olivar. En: Bienes, R.; Marqués, R.J. (eds.). *Perspectivas de la degradación del suelo*. Forum Calidad. Madrid.
- Schumm, S.A.; 1999. Causes and control of channel incision. En: Darby, S.E.; Simon, A. (Eds.); 1999. *Incised rivers*. Jhon Wiley ans Sons Press. Chichester (United Kingdom).
- Sharma, P.M.; 1993. *Prevención y control de cárcavas a nivel de finca por medio de métodos vegetativos y estructurales temporales en Honduras tropical*. Proyecto RENARM/ Manejo de cuencas. CATIE. Turrialba (Costa Rica).
- Simon, A.; Darby, S.; 1999. The nature and significance of incised river channels. En: Darby, S.E.; Simon, A. (Eds.); 1999. *Incised rivers*. Jhon Wiley ans Sons Press. Chichester (United Kingdom).
- Soto, M.; 2008. Lucha contra la erosión en La Rioja Baja. *Páginas de Información Ambiental*, 27: 24-27.
- Stocking, M.; Murnaham, N.; 2003. *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*. Ediciones Mundi-Prensa. Murcia.
- Thiéry, E.; Lechallas, M.C.; 1891. *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*. Baudry et cie. París.
- Thomas, J.T.; Iverson, N.R.; Burkart, M.R.; Kramer, L.A.; 2004. Long-term growth of a valley-bottom gully, western Iowa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 995-1009.

- Valentín, C.; Poesen, J.; Li, Y.; 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63(2): 132-153.
- Varela, J.M. (Dir); 1999. *Inventario de obras de corrección hidrológica-forestal de las variables ambientales relacionadas con las mismas*. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid.
- Vicente, M.F.; 2009. Origen, evolución y dinámica actual de cárcavas del piedemonte norte del Guadarrama. Métodos de estudio y criterios para su gestión con bases ecológicas. Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA9).
- Vicente, F.; Sanz, M.A.; Lucía, A.; Martín-Duque, J.F.; 2009. Evolución geomorfológica en tiempos históricos recientes de cárcavas del borde del piedemonte norte del Guadarrama (Segovia, España): Estudio a partir de fuentes documentales. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol.*, 103(1-4): 49-64.
- Wohl E.; 2006. Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79: 217-248.
- Xu, X.Z.; Zhang, H.W.; Zhang, O.; 2004. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China. *Environmental Science & Policy*, 7: 79-86.
- Xu, X.Z.; Zhang, H.W.; Wang, G.Q.; Peng, Y.; Zhang, O.Y.; 2006. A laboratory study on the relative stability of the check-dam system in the Loess Plateau, China. *Land Degrad. Develop.*, 17: 629-644.
- Xu, X.Z.; Zhang, H.W.; Wang, G.Q.; Chen, S.C.; Dang, W.Q.; 2009. An experimental method to verify soil conservation by check dams on the Loess Plateau, China. *Environ. Monit. Assess.*, 159: 293-309.
- Yair, A.; Sharon, D.; Lavee, H.; 1980. Trends in runoff and erosion processes over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Hydrological Sciences Journal*, 25: 3, 243-255.
- Zaimes, G.N.; Schultz, R.C.; Tufekcioglu, M.; 2009. Gully and stream bank erosion in three pastures with different management in southeast Iowa. *Jour. Iowa Acad. Sci.*, 116(1-4): 1-8.
- Zeng, Q.L.; Yue, Z.Q.; Yang, Z.F.; Zhang, X.J.; 2009. A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia Stream, China. *Environ Geol*, 58: 897-911.

DESTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE LA CUBIERTA FORESTAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CORNEJA (ÁVILA): ANÁLISIS HISTÓRICO DE UN PROCESO DE GESTIÓN CAMBIANTE

Jorge Mongil Manso¹, Joaquín Navarro Hevia², Verónica Cruz Alonso¹ y Virginia Díaz Gutiérrez¹

¹ Grupo de Hidrología y Conservación. Universidad Católica de Ávila. Correo electrónico: jorge.mongil@ucavila.es

² Unidad de Hidráulica e Hidrología Forestal. E.T.S. de Ingenierías Agrarias (Palencia). Universidad de Valladolid.

Resumen

Las laderas de la cuenca alta del río Corneja (Ávila), hasta hace unos ciento cincuenta años, estuvieron cubiertas por bosques densos de encina y roble. Pero su gestión tradicional tuvo como resultado su destrucción prácticamente completa, debido a aprovechamientos irracionales de leña y madera, roturaciones, sobrepastoreo e incendios, fundamentalmente. Estos terrenos, desprovistos de su protección natural, sufrieron intensos procesos erosivos cuya consecuencia fue la aparición de numerosas cárcavas y barrancos, y el consiguiente arrastre de materiales al río Corneja y, de éste, al Tormes. Ante esta situación, entre 1964 y 1971, la Confederación Hidrográfica del Duero proyectó una restauración hidrológico-forestal que afecta a unas 4.500 ha. El resultado ha sido un bosque de pinos y la retención de sedimentos en más de un centenar de diques forestales, que supusieron notables beneficios sobre el suelo y el ciclo hidrológico. Los objetivos de este trabajo son reconstruir la evolución de la cubierta vegetal desde que existen evidencias documentales hasta la actualidad, y analizar los modelos de gestión y su incidencia en la vegetación forestal original. El estudio permite afirmar que la gestión tradicional de los montes de *Quercus* y la ausencia de medidas de protección efectivas llevaron al colapso del ecosistema original, y promovieron agudos procesos de erosión. La Administración ha logrado rehabilitar el ecosistema, pero se requiere aún de una última etapa hasta llegar a un ecosistema próximo al original.

Palabras clave: *Restauración hidrológico-forestal, Gestión forestal tradicional, Erosión, Cárcavas, Badlands*

INTRODUCCIÓN

Las interacciones entre sociedad, economía y uso de los montes han sido complejas a lo largo de la historia y han implicado variaciones en las formas de gestionar y explotar los montes (IRIARTE, 2003). Hasta hace unos ciento cincuenta años, las laderas que conforman la cabe-

cera de la cuenca del río Corneja (Ávila) estuvieron pobladas por bosques densos de encina y, en las cotas más altas, de roble (BARRANCO, 1997; DEL SER, 1998; GÉNOVA *et al.*, 2009). Sin embargo la gestión tradicional de estos montes, carente de una normativa eficaz de conservación de los recursos forestales, implicó su destrucción casi completa. Este no es un hecho aislado

en la zona, ya que en la vecina sierra de Gredos, la acción antrópica deforestadora, fundamentalmente para el establecimiento de pastos y cultivos, es un proceso secular (GÉNOVA et al., 2009; CANTERO, 2003). La proliferación de cárcavas y arrastres de sólidos hacia los cauces, movió a la Administración hidrológica a recuperar la cubierta forestal (AZCARRETAZÁBAL, 1964), especialmente debido a la construcción aguas abajo de la presa de Santa Teresa en 1960. El presente trabajo pretende reconstruir la evolución histórica de la cubierta vegetal desde que existen evidencias documentales hasta la actualidad, así como analizar los diferentes modelos de gestión desde el punto de vista de su sostenibilidad y su incidencia en la destrucción o restauración de la vegetación forestal original.

MATERIAL Y MÉTODOS

La zona de estudio comprende los municipios de Tórtoles y Bonilla de la Sierra (con sus anejos de Cabezas de Bonilla y Pajarejos), situados en la provincia de Ávila. Está emplazada en el extremo más suroccidental de la Sierra de Ávila, una pequeña elevación integrada en el Sistema Central. Los materiales geológicos que afloran son fundamentalmente plutónicos, y presentan un aspecto meteorizado formando bolos y canchales. Los suelos resultantes son Orthents y Xerepts (USDA, 2010), bastante arenosos y con pH alrededor de 6. El relieve es accidentado, con colinas que alcanzan los 1.530 m enlazadas, mediante laderas de fuertes pendientes, con las zonas bajas de los valles de los modestos arroyos y barrancos situados alrededor de los 1.100 m. Hidrográficamente la zona se sitúa en la cuenca del río Corneja, afluente del Tormes, dentro de la cuenca del Duero. El clima es mediterráneo continental, con una precipitación anual media de 584 mm. La temperatura media anual es 10,60 °C, la media de las mínimas del mes más frío -1,7 °C y la media de las máximas del mes más cálido 28,10 °C. La vegetación correspondería de forma natural a un bosque de encina (*Quercus ilex* ssp. *ballota*) y, en las zonas más altas, de roble melojo o rebollo (*Quercus pyrenaica*).

Para caracterizar la zona de la restauración en su estado inicial degradado y poder compararlo con el estado actual, desde el punto de vista de la dinámica erosiva y de la vegetación, se han utilizado las siguientes fuentes de información: Catastro del Marqués de la Ensenada (1750-1760); Diccionario Geográfico-Estadístico de Madoz (1845-1850); catálogos antiguos de montes de utilidad pública, en concreto se han consultado la Clasificación de Montes Públicos Exceptuados de Desamortización (1859) (ICONA, 1990), el Catálogo de los Montes Públicos Exceptuados de la Desamortización (1862) (ICONA, 1991), el Catálogo de los Montes y demás Terrenos Forestales Exceptuados de la Desamortización por Razones de Utilidad Pública (1901) (ICONA, 1993), y el actual Catálogo de Montes de Utilidad Pública (JCYL, 2001); fotografías aéreas (1945, 1956, 1977, 1984 y 2002); proyectos de restauración de la Confederación Hidrográfica del Duero (entre 1964 y 1971), con una buena colección de fotografías anteriores a la restauración; y fotografías actuales realizadas en los recorridos efectuados en campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución del monte hasta su destrucción

En la tabla 1 se realiza una síntesis de la evolución de la cubierta forestal de la zona de estudio. Se sabe que los pueblos prehistóricos que habitaban la zona se dedicaban a la agricultura y la ganadería. Existen vestigios también de la época romana y visigoda, periodos en los que la actual Bonilla de la Sierra era un asentamiento de cierta importancia. Esta villa fue tomada por el conde castellano Fernán González a los sarracenos en 981 d.C., por lo que en aquel momento debía constituir una población estable (BARRANCO, 1997). Las políticas de repoblación en el Valle del Corneja se basaron en el afianzamiento de los núcleos ya existentes y no en la creación de otros nuevos, de manera que en 1209 se calcula que Bonilla tendría cerca de 200 habitantes. Debido a que Bonilla formaba parte del territorio periférico del alfoz de Ávila y, por tanto era difícil de controlar desde allí, fue convertida en señorío a principios del siglo XIII,

siendo su primer señor el obispo abulense Domingo Blasco. Posteriormente Bonilla se convierte en el núcleo principal del patrimonio del obispado al que se van anexionando territorios. La tierra se usaba según círculos concéntricos en torno a las poblaciones: cerca del pueblo se localizaba la zona más fértil con huertos, linares, prados, etc.; a continuación los trigales y viñas; y por último, la parte más alejada, formada en este caso por espesos montes de encina y roble, se usaba como pastizales, para extraer leña o para sembrados aislados. Está demostrada la presencia de pinos en la zona mediante el análisis de polen (GÉNOVA et al., 2009), y existen algunas referencias toponímicas medievales que así parecen atestiguarlo: en la venta de una moheda (lugar con vegetación espesa, llena de árboles y maleza) al concejo de Bonilla de la Sierra en 1295, se habla de un lugar denominado Navalpinareda (DEL SER, 1998; GÉNOVA et al.; 2009); y en el libro de la Montería (siglo XIV) se menciona el topónimo Pinareio en el Valle del Corneja (GÉNOVA et al.; 2009).

A principios del siglo XIV, a consecuencia de una crisis alimentaria, el señor de Bonilla cedió tierras a quienes estuvieran dispuestos a cultivarlas, naciendo como consecuencia pequeñas poblaciones en las navas de montaña y en las zonas libres del llano. Es posible que en aquel momento nacieran las aldeas de Tórtoles, Pajarejos y Cabezas, a modo de arrabales de Bonilla, como avanzadilla en la colonización y roturación de las zonas serranas más próximas a “los rebollares”, de los que queda vestigio en algunos topónimos actuales como El Rebollar o Dehesa de Rebollar del Puerto. Probablemente en este momento comenzaran a generalizarse los procesos erosivos, ya que existe constancia de que en la cercana sierra de Villanueva, al este de la zona de estudio, el suelo estaba muy erosionado debido a las roturaciones realizadas que fomentaban la escorrentía en las laderas (BARRANCO, 1993). También en el siglo XIV se constituye la Comunidad de Villa y Tierra de Bonilla, que comprendía esta villa y las aldeas de sus alrededores. Su objetivo era la explotación racional de los recursos y la participación en los gastos de forma compartida, aunque muchos atribuyen su formación al deseo de las oligarquías locales de aprovecharse de pastos

infrautilizados (BARRANCO, 1997). Con la Comunidad se crea una nueva estructura de explotación del suelo que implica la ruptura de espacios naturales, la conquista del monte, la especialización en determinados cultivos, la unificación del terrazgo en cuanto, por ejemplo, a la siembra, los pagos, etc., la cesión de derechos, como la derrota de mieses, y la creación de espacios comunitarios de la aldea (tres dehesas, ejidos, moheda, etc.) y de la Comunidad (como “los rebollares”, donde todos los concejos tenían su parte para pasto). También se delimitan los baldíos, o terrenos comunitarios de la Villa y Tierra, donde podían pastar todos los animales de la Comunidad (como La Jara, que podría coincidir con el topónimo actual de Hoya de la Jara), y las laderas (zonas de mayor pendiente de la Comunidad). A diferencia de otras villas y aldeas, la comunidad de Bonilla poseía una economía basada tanto en la agricultura (centeno, cebada, trigo y garbanzos) como en la ganadería (la mayor parte del ganado era ovino, aunque también el vacuno, caprino y porcino). Los aprovechamientos en el monte no se limitan a la corta de leña o madera, sino también a la entrada de ganado, como se plasma en un documento de 1335 en que Alfonso XI ordena al concejo de Piedrahíta que autorice a los vasallos del obispo de Ávila a meter el ganado y sacar madera y leña de las sierras y ejidos de Bonilla: “*Et que agora nuevamente que les non queredes consentir que pasçan en las sierras e exidos de Piedrahíta segunt que husaron siempre a pasçer e cortar lenna e madera en la manera que dicha es*” (DEL SER, 1998; GÉNOVA et al.; 2009).

A principios del siglo XVI en un documento de quejas y peticiones que se presenta al señor de Bonilla, queda patente que el obispo admitía más ganado en el término que lo que mandaban las ordenanzas, y que obligaba a labrar la moheda (BARRANCO, 1997). Los intentos por roturar las laderas enfrentó a agricultores y ganaderos, que se negaban a perder superficie pastable. En las nuevas ordenanzas del siglo XVI destaca la gran preocupación sobre la conservación de los montes (BARRANCO, 1997). Así, en la ley XII se puede leer: “*...Por quanto estando como está esta villa e su tierra asentada e situada en tierra tras de sierra estéril, e no tiene otros propios sino los montes que tiene, e se crían e criarán, aviendo*

buena guarda e racaudo en ellos, e estos montes faltando, no se podían sussentar los vecinos, e porque fasta aquí no avía tan buena guarda e orden como a la guarda dellos convenía, para que antes se aumentasen e que no se destruyesen ny disminuyesen, lo qual todo es muy notorio, e sin ellos no se diesen e pusiessen de una buena orden, para que dichos montes de qui adelante se quiten y eviten los tales daños o los males que quitar y arredrar se les pueda, en especial en la Moheda...”. Las ordenanzas recogen importantes penas para quien infrinja las leyes de montes, se prohíbe cortar encinas y robles en algunas zonas, así como sus copas y también tomillos, se restringen derechos ancestrales de oficiales públicos para reforzar la protección del monte, se regula la forma en que los pastores pueden hacer lumbre, se controla el consumo de leña y bellotas, se prohíbe coger “cáscara” de encinas y robles, se prohíbe ramonear y varear encinas, entre otras restricciones. Sin embargo, esta normativa no fue eficaz, y la roturación de los terrenos forestales fue continua: debido a la recuperación económica y demográfica, se produjo el desarrollo de los arrabales de Tórtoles y Cabezas equiparándolos a otras aldeas, gracias a su proximidad a los rebollares, donde se encontraban los mejores pastos comunitarios, que favoreció su desarrollo ganadero (BARRANCO, 1997).

Junto a un declive demográfico, una crisis financiera en la Iglesia abulense hace que, con consentimiento papal, el señorío eclesiástico de Bonilla se desmembrara, perdiendo las villas no integradas en la Comunidad de Villa y Tierra

(BARRANCO, 1997). El Catastro del Marqués de Ensenada (hacia 1750) habla de un monte alto de encina propio de la Comunidad y de una dehesa de pastos (tabla 1). La proporción entre terreno cultivado e inculto en el territorio de la comunidad rondaba el 50%. Se tiene noticia de que las encinas de la villa se vieron afectadas por un ataque de oruga en los años 1772 y 1773, produciendo enormes pérdidas en la recogida de bellota; para acabar con la plaga se sacó en procesión por el monte al Santísimo Cristo de la Misericordia, cosechándose al año siguiente una cantidad de bellota valorada en 200.000 reales (BARRANCO, 1997). Aproximadamente un siglo después, cuando la población de la Comunidad alcanza su máximo histórico, MADDOZ (1850) menciona montes de encina en Tórtoles, Pajarejos y Cabezas, además de una chopera en esta última localidad (tabla 1). Aunque normalmente los montes incluidos en la Clasificación de 1859 como exceptuados de desamortización, por no ser desamortizados ni vendidos, se incluían en el posterior Catálogo de Montes de Utilidad Pública, los que aparecieron registrados en Tórtoles y Bonilla (tabla 1) no siguieron ese camino y quedaron bajo la pertenencia de los ayuntamientos sin ningún tipo de protección. Las fotografías aéreas de la zona muestran de forma fehaciente la evolución de la vegetación durante el siglo XX (tabla 1 y figura 1): la imagen de 1945 revela la ausencia total de vegetación arbórea, mientras que en la del 2002 son continuas las manchas de pinares densos procedentes de la restauración que a continuación se describirá.



Figura 1. Fotos aérea

FECHA	FUENTE	REFERENCIAS
1295	DEL SER (1998) GÉNOVA et al. (2009)	El concejo de Bonilla compra una moheda, y se menciona el topónimo “Navalpinareda”, que podría indicar la presencia de pinos.
Principios s. XIV	BARRANCO (1997)	Mención a los rebollares, dehesas, ejidos, mohedas, baldíos y laderas.
s. XIV	Libro de la Montería GÉNOVA et al. (2009)	Topónimo “Pinareio” en el Valle del Corneja, que podría indicar la presencia de pinos.
s. XIV	BARRANCO (1993)	En la sierra de Villanueva (al este de la zona de estudio) el suelo está muy erosionado por las muchas roturaciones y la escorrentía.
1500-1565	BARRANCO (1997)	Ordenanzas con preocupación por la conservación de los montes. Se prohíbe la corta de encinas y robles en determinados lugares.
1750	Catastro de Ensenada	“Monte alto propio de la villa de Bonilla, sus arrabales y aldeas de su tierra y jurisdicción todo poblado de encinas” de 804 fanegas (aprox. 586 ha), en el que se aprovecha la leña y la bellota. Dehesa de pastos de 246 fanegas (unas 172 ha). Aún hay una masa forestal importante.
1850	Diccionario Madoz (MADOZ, 1850)	Tórtoles: “monte de encinas el cual se labra”. Cabezas de Bonilla: “un monte con arbolado de encina, una alameda de álamos llamados chopos”. Pajarejos: “un pequeño monte de encina”. En Bonilla no se cita monte, posiblemente por encontrarse ya muy degradado.
1859	Clasificación de montes públicos (ICONA, 1990)	Tórtoles: Exceptuados: “Jara”, 70 ha, encina, roble. “Dehesa Boyal”, 20 ha, roble, roble; Enajenables: “El Monte”, encina, roble. Bonilla: Exceptuados: Los Majadales y Moheda, 300 ha, encina, roble; Enajenables: Majadas y Mohedas, 300 ha, encina, roble (es obvio que hay un error porque se trata del mismo monte).
1862	Catálogo MUP (ICONA, 1991)	No consta monte, ya que ningún terreno forestal de la Clasificación anterior pasó a formar parte del Catálogo, seguramente al encontrarse ya muy degradados.
1901	Catálogo MUP (ICONA, 1993)	No consta monte.
1945	Foto aérea (Figura 1)	No se ven árboles en el espacio de la restauración. Se ve la zona del monte Jara como un encinar poco denso.
1956	Foto aérea	No se ven árboles en el espacio de la restauración. Se ve la zona del monte Jara como un encinar poco denso.
1964-1971	Proyectos de restauración (Tabla 2)	Topónimo “Las Cárcabas” (sic). Fotos en las que se ven las cárcavas y los terrenos deforestados.
1970	Foto aérea	Se aprecia con detalle dónde se hizo la repoblación, la preparación del suelo. Esto nos permite saber qué terrenos se repoblaron y cuáles no, y dónde fue un fracaso la repoblación.
2002	Foto aérea (Figura 1)	Se ve la masa forestal actual
2012	Catálogo MUP actual	No consta monte

Tabla 1. Evolución histórica de la cubierta forestal

Trabajos de restauración

Como consecuencia de todos los factores históricos hasta ahora explicados, entre los que destacan el sobrepastoreo y el abusivo aprovechamiento de leñas y madera del monte, la vegetación arbórea se fue degradando. Así se describe en uno de los proyectos de restauración

que se emprendieron (AZCARRETAZÁBAL, 1964): “*El pastoreo abusivo primero (sin tener en cuenta las primitivas talas que descuajaron el monte de roble del que todavía quedan vestigios dispersos por toda la zona) las roturaciones efectuadas en grandes altitudes en terrenos de fuertes pendientes, han degradado sumamente*

los terrenos en los que se presentan fuertes erosiones y multitud de ellas en iniciación, con escasa vegetación muy maltrecha ésta en todo caso”. Así, a mediados del siglo XX la cuenca del río Corneja estaba casi deforestada por completo, apareciendo graves procesos de erosión, razón por la que la Confederación Hidrográfica del Duero se plantea la restauración. Para que la ejecución fuera más sencilla, se decidió dividir el proyecto en varias partes, en concreto se redactó un proyecto para cada localidad: Tórtoles, Cabezas de Bonilla, Pajarejos, Casas del Puerto de Villatoro y Bonilla de la Sierra. Además un proyecto final se encargaba de la repoblación con frondosas en las partes más bajas de otros términos municipales, llegando hasta el propio río Corneja. En la tabla 2 se recogen los diferentes proyectos con una síntesis de las actuaciones planteadas. El autor de los proyectos fue el ingeniero de montes David Azcarretazabal Mantecón, que describía la zona de esta manera (AZCARRETAZÁBAL, 1964): “*Está la zona que nos ocupa despoblada de vegetación arbórea existiendo solamente matorral y erosiones frecuentes que proporcionan gran cantidad de arrastres que a través del río Corneja van al río Tormes, aguas arriba del embalse de Santa Teresa en la provincia de Salamanca*”. Como muestra, en la tabla 3 se

exponen las principales características del proyecto correspondiente al municipio de Tórtoles.

CONCLUSIONES

La reconstrucción de la evolución histórica de la cubierta vegetal de la zona estudiada de la cuenca alta del río Corneja y el análisis de los diferentes modelos de gestión permiten afirmar que la gestión tradicional -sin medidas legales de protección efectivas -de los montes naturales de *Quercus ilex* y *Quercus pyrenaica* generaron el colapso en el ecosistema original. La pérdida de la protección del suelo que implica la vegetación forestal supuso la aparición de procesos erosivos como caída de detritos, erosión laminar, en regueros, en cárcavas y en barrancos. La actuación, en la década de los años 60 del siglo XX, de la Administración hidrológica para evitar la llegada de sedimentos al vaso del embalse de Santa Teresa ha conseguido rehabilitar algunas funciones del ecosistema, ya que las repoblaciones de diversas especies del género *Pinus*, fundamentalmente, han conseguido frenar en gran medida la erosión, han acelerado los procesos edafogénéticos, han regulado la escorrentía y la infiltración y ha creado un medio propicio para la futura restauración del bosque original. Sin embargo, en la

TÍTULO	AÑO	DESCRIPCIÓN
Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja. Tramo I. TM de Tórtoles	1964	Proyectados 313 diques y repoblación de 428 ha con Ppt y Psl
Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja (Embalse de Santa Teresa). Tramo II. TM de Cabezas de Bonilla (Ávila).	1964	Proyectados 421 diques y repoblación de 980 ha con Ppt, Php, Psl
Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja (Embalse de Santa Teresa). Tramo III. TM de Pajarejos (Ávila).	1965	32 diques y repoblación de 588 ha de repoblación con Ppt, Php, Psl
Proyecto de repoblación forestal en la cuenca del río Corneja. Tramo IV. TM de Bonilla de la Sierra (Ávila). Embalse de Santa Teresa.	1965	Repoblación en 920 ha con Php, Ppt
Proyecto de repoblación forestal -cuenca del río Corneja-. Tramo V. TM de Casas del Puerto de Villatoro (Ávila). Embalse de Santa Teresa	1971	Repoblación en 959 ha con Php, Ppt, Psl
Proyecto de repoblación forestal en la cuenca del río Corneja. Tramo VI-Frondosa-. TM de Piedrahita y otros (Ávila). Embalse de Santa Teresa	1970	Repoblación de 179 ha con Pxe, clones 5 y negrito, y aliso

Tabla 2. Relación de proyectos de restauración. Ppt: *Pinus pinaster*; Php: *Pinus halepensis*; Psl: *Pinus sylvestris*; Pxe: *Populus x euramericana*

Superficie de actuación	428,41 ha
Altitud	1.100-1.500 m
Régimen legal	Propiedad del Ayuntamiento, carácter comunal, consorcio con la Confederación Hidrográfica del Duero
Especies antes de la restauración	<i>Populus nigra</i> (E), <i>Quercus ilex</i> ssp. <i>ballota</i> (ME), <i>Quercus pyrenaica</i> (ME), <i>Populus tremula</i> (ME), <i>Salix caprea</i> (ME), <i>Crataegus monogyna</i> (ME), <i>Rosa canina</i> (ME), <i>Sambucus nigra</i> (ME)
Elección de especies	<i>Pinus pinaster</i> (especie principal), <i>Pinus sylvestris</i> (zonas altas) y mezcla de ambas en zonas intermedias. Aunque no aparecen en el proyecto, también se utilizaron <i>P. halepensis</i> , <i>P. nigra</i> y <i>Cupressus arizonica</i>
Preparación del suelo	Fajas alternas de 1 m de anchura y 2 m de separación con contrapendiente. En ellas, con una separación de 1,5 m, se abren casillas de 0,30 x 0,30 x 0,30 m, densidad de 3.333 hoyos/ha
Cuidados complementarios y posteriores	Acotamiento total al pastoreo. Escardas en las casillas para eliminar la vegetación. Reposición de marras. Senda de 1 m de anchura para facilitar el acceso al monte
Diques	Se proyectaron 313 diques de gaviones, de 7 modelos diferentes, en los 11 barrancos principales, de los que se construyeron 123

Tabla 3. Principales características de la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles. E= Escasa; ME= Muy escasa

actualidad la gestión de estos montes es prácticamente inexistente, lo que supone un riesgo para la conservación de este frágil ecosistema.

BIBLIOGRAFÍA

- AZCARRETAZABAL, D.; 1964. *Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja. Tramo I, término municipal de Tórtoles*. Confederación Hidrográfica del Duero. Valladolid.
- BARRANCO, D.; 1993. *En busca de las raíces de Villanueva del Campillo*. Institución Gran Duque de Alba. Ávila.
- BARRANCO, D.; 1997. *Una aproximación histórica a dos comunidades de villa y tierra abulenses: la episcopal Bonilla y la señorial Villatoro*. Institución Gran Duque de Alba. Ávila.
- CANTERO, A.; 2003. Socio-economía y paisaje forestal de la Sierra de Gredos. El caso de El Arenal (Ávila). *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 16: 309-313.
- DEL SER, G.; 1998. *Documentación medieval en los archivos municipales abulenses*. Institución Gran Duque de Alba. Ávila.
- GÉNOVA, M.; GÓMEZ, F. Y MORLA, C.; 2009. *Los bosques de Gredos a través del tiempo*. Junta de Castilla y León. Valladolid.
- ICONA; 1990. *Clasificación General de los Montes Públicos, 1859*. Imprenta nacional. Reedición facsímil del ICONA. Madrid.
- ICONA; 1991. *Catálogo de los Montes Públicos Exceptuados de la Desamortización, 1862*. Reedición facsímil del ICONA. Madrid.
- ICONA; 1993. *Catálogo de los Montes y demás Terrenos Forestales Exceptuados de la Desamortización por Razones de Utilidad Pública, 1901*. Reedición facsímil del ICONA. Madrid.
- IRIARTE, I.; 2003. La funcionalidad económica y social de los montes. Un esbozo de las transformaciones de largo plazo. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 16: 31-40.
- JCYL; 2001. *Catálogo de los montes de utilidad pública de la provincia de Ávila*. Junta de Castilla y León. Zamora.
- LUIS, C.; 1987. *Colección documental del archivo municipal de Piedrahíta (1372-1549)*. Institución Gran Duque de Alba. Ávila.
- MADOZ, P.; 1850. *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar*. Edición facsímil (2000), Ávila. Ed. Ámbito. Madrid.
- USDA; 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. <http://soils.usda.gov/technical/classification> (Consulta: 2-9-2012).



**6º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL**

6CFE01-269

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia)

RAMOS DIEZ, I.¹, NAVARRO HEVIA, J.¹, BARTOLOMÉ SAN MIGUEL, D.¹, DÍAZ GUTIERREZ, V.² y MONGIL MANSO, J.²

¹ Unidad de Hidráulica e Hidrología. E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.

² Grupo de Hidrología y Conservación. Universidad Católica de Ávila.

Resumen

Los paisajes acaravados o *badlands*, aunque ocupan una mínima extensión en el sur de Europa, emiten cantidades notables de sedimentos. Alrededor de Saldaña (Palencia), se extienden 3,17 km² de cárcavas sobre terrenos arcillosos del Terciario y Cuaternario, bajo clima mediterráneo continental. Su proximidad al municipio y al río Carrión provocaba problemas sobre infraestructuras y la calidad hídrica. Para frenarlos, la Confederación Hidrográfica del Duero ejecutó una restauración hidrológico-forestal en 1930, con varias centenas de diques gavionados y la repoblación de las vertientes. En este trabajo se ha analizado la efectividad de los diques en una cárcava tipo de la restauración de 1930, midiendo el volumen de sedimentos retenido, mediante levantamiento topográfico. Además se ha relacionado la producción de sedimentos con la evolución de la vegetación, mediante interpretación fotográfica (1930, 1946, 1956, 1984, 2001 y 2011), estableciendo un umbral de erosión acorde con ella. El volumen de sedimentos retenidos es de 689,59 m³. La cobertura vegetal, inexistente en 1930, alcanza el 84,8% en 1984 y el 87% en 2011. Las tasas erosivas son $\geq 7,63$ t/ha·año entre 1930-84, lo que supone pérdidas inadmisibles para terrenos con graves limitaciones para la instalación de la vegetación natural. El control erosivo y la recuperación del bosque alcanzados muestran que la restauración ha sido beneficiosa.

Palabras clave

Pérdidas de suelo, *badlands*, restauración de cárcavas, diques de retención, gaviones.

1. Introducción

La erosión hídrica es un proceso que consiste en la remoción y transporte, total o parcial, del terreno debido a la acción del agua, que lleva asociado pérdidas de suelo muy importantes. La erosión hídrica se clasifica cuando el proceso erosivo se produce por arroyada superficial en: laminar, regueros, cárcavas y barrancos.

Las cárcavas se generan por la acción de la escorrentía en los regueros, los cuales se agrandan y profundizan como consecuencia de la socavación del agua. También las grietas superficiales del terreno en terrenos arcillosos y la disolución o arrastre de partículas en el interior del suelo generan procesos de tubificación que inducen el colapso del terreno y la aparición de cárcavas. Su morfología contribuye a la escorrentía superficial concentrada que en lugares con lluvias torrenciales, escasa cobertura vegetal y bajo contenido en materia orgánica induce altas tasas de erosión. El desarrollo y multiplicación de las cárcavas, generan las denominadas malas tierras, mal país o *badlands* (CLOTET *et al.*, 1987). Estas áreas pueden aparecer sobre cualquier tipo de texturas y suelen estar ligadas a importantes desniveles geomorfológicos o cambios en la red de drenaje (MATHER *et al.*, 2002). En otras

ocasiones ha sido un deficiente manejo y conservación del suelo a lo largo de la historia el responsable de su desarrollo (NAVARRO *et al.*, 2012; MONGIL *et al.*, 2012). Para el control y corrección de los procesos erosivos asociados a las cárcavas se plantean obras de restauración hidrológico-forestal, basadas en la recuperación de la cubierta vegetal y la construcción de diques forestales, cuya función particular es la regulación de caudales, el control de la erosión en el cauce y márgenes y la retención de sedimentos (DÍAZ *et al.*, 2012b). Los diques forestales son estructuras usuales en España (VARELA, 1999; MARTÍNEZ DE AZAGRA *et al.*, 2002) por lo que resulta muy importante conocer sus efectos y función (CASTILLO *et al.*, 2007; BOIX-FAYOS *et al.*, 2007; ROMERO 2008; DÍAZ *et al.*, 2012a, 2012b).

En el entorno de Saldaña (Palencia) se extiende una zona de *badlands*, que desde el siglo XVIII constituía un paisaje abarrancado e intensamente desertificado, que originaba graves problemas en la localidad, tanto en obras de infraestructura (carreteras y canales de riego) como aguas abajo de la misma, en la cuenca del río Carrión (abastecimiento), interfiriendo de manera intensa en la vida de las poblaciones próximas (NAVARRO *et al.*, 2012). Por ello, en 1930, el Servicio Forestal de la Confederación Hidrográfica del Duero abordó la restauración hidrológico-forestal de las laderas de la margen izquierda del río Carrión, donde las cárcavas se extendían en una superficie de unos 9 km², mediante la construcción de diques de mampostería gavionada y la revegetación de las cuencas vertientes. El inventario realizado por MARTÍNEZ DE AZAGRA *et al.* (1997), sitúa 107 diques gavionados, 102 de los cuales se datan del proyecto de AYERBE (1930) y 5 del proyecto complementario de AZCARRETAZÁBAL (1963).

Este estudio surge dentro de las investigaciones desarrolladas por la U.D. de Hidráulica e Hidrología de la E.T.S.II.AA. de Palencia (Universidad de Valladolid) en colaboración con el Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila sobre los efectos de la restauración hidrológico-forestal en las cárcavas. Se centra en una zona poco estudiada a diferencia de zonas de ambientes mediterráneos del sur y este de nuestro país, pero de gran interés debido a la litología, el clima y sus impactos en la zona. En este caso se pretende analizar la idoneidad y efectividad de los diques como estructuras para el control de la erosión ante la controversia generada sobre sus efectos en algunos trabajos como los de CASTILLO *et al.* (2007) y BOIX-FAYOS *et al.* (2007). Para llevar a cabo esta evaluación se estima el volumen de sedimentos retenidos por los diques forestales construidos en una cárcava modelo de la restauración de Saldaña, junto con la evolución morfológica y vegetal a lo largo del tiempo y se contrastan los resultados obtenidos para la zona, con los aportados por otros autores en otras zonas de *badlands*.

2. Objetivos

Estimar el volumen de sedimentos retenidos por los diques forestales construidos en una cárcava modelo de la restauración de Saldaña, relacionándolos junto con la evolución morfológica y vegetal a lo largo del tiempo y contrastando los resultados obtenidos para la zona, con los aportados por otros autores para otras zonas de *badlands*.

3. Metodología

La cuenca de estudio, se localiza en el término municipal de Saldaña, provincia de Palencia, Comunidad de Castilla y León. Pertenece a la comarca de páramos y valles

palentinos, siendo una zona de transición entre la montaña y tierra de campos. La cárcava de estudio, es la denominada como cárcava 20 (AYERBE, 1930). Se sitúa en el paraje “Cardo de los Valles” al sureste del municipio de Saldaña. Sus coordenadas geográficas medias son 42° 30’ 45,56” N; 4° 43’ 24,11” W y las coordenadas UTM, datum ETRS89 Huso 30N medias son: X: 358418,05; Y: 4708223,61. Cuenta con una superficie de 27.650,82 m²

La zona presenta un clima mediterráneo continental. La precipitación media anual, alcanza los 528,1 mm para la serie 1945 – 2009 y la temperatura media anual los 9,5 °C. Cabe destacar la acusada irregularidad pluviométrica de las precipitaciones, cuya erosividad es baja a moderada (62 hJ·cm·m⁻²·h⁻¹). La geología de la zona destaca por ser zona de transición entre los aluviones del Cuaternario y la cobertera de sedimento arcilloarenoso y acarrees cuarcíticos del Páramo del Terciario. Se trata de terrenos pertenecientes al Mioceno y Cuaternario. En cuanto a los suelos, son pobres en materia orgánica, con texturas ricas en arcillas y baja capacidad de retención de agua (50 mm). El factor de erosionabilidad de la USLE medio toma valores medios-altos (0,39 – 0,54 t·m²·h·ha⁻¹·hJ⁻¹·cm⁻¹). Hidrológicamente, la cuenca presenta un relieve pronunciado, siendo su pendiente media del 52,16%, lo que la confiere una alta torrencialidad.

La metodología empleada sigue una secuencia que conlleva a la determinación de tasas erosivas a partir del volumen de sedimentos retenido por las hidrotecnias construidas en la cárcava de estudio, así como la determinación de tasas de variación morfológica y vegetal a lo largo del tiempo. En primer lugar se ha realizado un análisis de la cartografía actual de la zona según diversas fuentes y de la idoneidad de esta para la elaboración de análisis morfológicos a nivel de cuenca. Se ha seleccionado aquella cuyos datos eran más fiables, debido a su exactitud o mayor aproximación al terreno. Las cartografías seleccionadas son:

- AYERBE (1930), ya que se trata de una cartografía elaborada mediante levantamiento topográfico en campo. Se emplea como supuesto de partida, pues es la única disponible y más antigua.
- El Modelo Digital del Terreno (MDT) con paso de malla de 5 metros elaborado por el IGN (2011). Esta será la cartografía base del estado actual de la cuenca de estudio, por su coherencia con la altimetría del terreno

Siguiendo las afirmaciones planteadas por JARIEGO *et al.* (2010) las fotografías aéreas realizadas en España son apropiadas para determinaciones a nivel de cárcavas permanentes o de *badlands*. Además GÓMEZ *et al.* (2009a) analizan los errores tanto de ortofotografías como de vuelos aéreos, siendo estos de una magnitud poco influyente al nivel de trabajo de este estudio. Conforme a estos planteamientos se demuestra la idoneidad de las ortofotos y vuelos aéreos de la zona para la determinación de tasas de variación morfológica (superficie y perímetro) y evolución de la vegetación.

Una vez analizada la cartografía, se han caracterizado morfológicamente la cuenca y su red de drenaje mediante sus parámetros físicos (MARTÍNEZ DE AZAGRA y NAVARRO 1996). Mediante gvSIG 1.11 se ha empleado la base cartográfica seleccionada para el análisis del estado actual (2011) y anterior a la restauración (1930).

Posteriormente se procedió a la localización de los diques con el empleo del GPS Garmin Etrex Vista mediante la situación de un punto en el centro del vertedero. Seguidamente se realizaron las determinaciones del volumen de sedimentos retenido por los

diques según la metodología de DÍAZ *et al.* (2012a). Se trata de un levantamiento topográfico con estación total. El levantamiento de puntos se ha realizado con una estación total Leica Tc 307, con equidistancia entre puntos de 1m, que determinan la sección aguas abajo del dique, la pendiente longitudinal, el lecho del cauce y la superficie de la cuña de sedimentos. Con los datos, se han realizado las secciones transversales de la cuña de sedimentos mediante el empleo de software de diseño AUTOCAD 2011, determinando su área. Con esta área, se ha calculado el volumen con EXCEL 2003 para cada par de secciones transversales aplicando la fórmula del prismoide (1), que es la que ofrece mayor precisión en el cálculo de estos volúmenes (CASANOVA, 2002):

$$V = \frac{d}{6} \cdot (B_1 + B_2 + 4B_m) \quad (1)$$

Donde: d , es la distancia entre secciones a calcular; B_1 y B_2 , es el área de las secciones extremas y B_m , es el área de la sección media.

Este volumen de sedimentos obtenido se ha transformado en peso mediante los valores de densidad aparente muestreados en las calicatas realizadas, con el método de los cilindros, (tres muestras por dique) para su caracterización. En función de la superficie afectada por dichas obras, y el peso de estos sedimentos, se pueden determinar umbrales de tasas erosivas o de acumulación de sedimentos para la cárcava de estudio.

En cuanto al análisis hidromorfológico y de vegetación, se ha seguido una secuencia cronológica de ortofotos e imágenes georeferenciadas a lo largo del tiempo. Para ello, se ha usado como base para la comparación la superficie actual (ortofoto 2011), los vuelos georeferenciados de 1946, 1956 y 1984 y la ortofoto de 2001 (ITACyL, 2001) obteniendo una secuencia cronológica de la evolución (RAMOS, 2012).

4. Resultados

Según la metodología planteada, se ha determinado el volumen de sedimentos retenidos por los diques construidos en la cárcava de estudio, que asciende a un total de 689,60 m³. Los resultados obtenidos por dique, oscilan entre los 70,92 m³ del dique 46 y los 192,77 m³ del dique 44. Además se ha determinado la densidad aparente de los sedimentos retenidos por cada dique que varía entre 1,38 y 1,49 t/m³, siendo la media de 1,46 t/m³. A partir de estas cifras, la masa total de sedimentos retenidos es de 1.000,84 t. Los resultados de volumen, densidad aparente y peso de sedimentos por dique analizado se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Volumen (m³), densidad aparente (t/m³) y peso (t) para los sedimentos retenidos por los diques analizados.

Dique	Volumen (m ³)	Densidad (t/m ³)	Masa (t)
Nº 42	169,51	1,46	247,48
Nº 43	177,02	1,38	244,28
Nº 44	192,77	1,49	287,22
Nº 45	79,38	1,49	118,28
Nº 46	70,92	1,46	103,55
Total	689,60	1,46 (media)	1.000,81
Desviación típica	57,99	0,05	83,37
Coefficiente de variación (%)	42,04	3,09	42,15
Intervalos confianza (95%)	(65,92;209,92)	(1,40;1,51)	(96,64;303,68)

A partir del resultado obtenido de peso total de los sedimentos retenidos, la superficie controlada por los diques (2,678 ha) y el periodo de tiempo transcurrido desde su construcción hasta el momento actual (77 años), se ha determinado el umbral mínimo de la tasa de erosión o grado de retención en la cuenca. Esta tasa erosiva asciende a 4,85 t/ha·año. Por otro lado, si analizamos la tasa erosiva hasta la colmatación de los diques, fecha que se ha datado en torno a 1984, mediante el análisis de la evolución de la cubierta vegetal en la fotografía aérea, este valor aumenta hasta las 7,63 t/ha·año.

El análisis de la variación morfológica y vegetal a lo largo de la secuencia temporal se ha realizado mediante la evolución de la superficie y vegetación de la cárcava de estudio a partir de la interpretación de altimetría, fotogramas aéreos y ortofotos de la zona. Se ha ejecutado una comparación morfológica de la cárcava tanto en perímetro como en superficie a lo largo de la secuencia 1930, 1946, 1956, 1984, 2001 y 2011. En esta misma secuencia se ha determinado la evolución de la vegetación mediante polígonos ocupados por esta. La Figura 1 y la Tabla 2 muestran los resultados obtenidos del análisis a lo largo de la secuencia temporal.

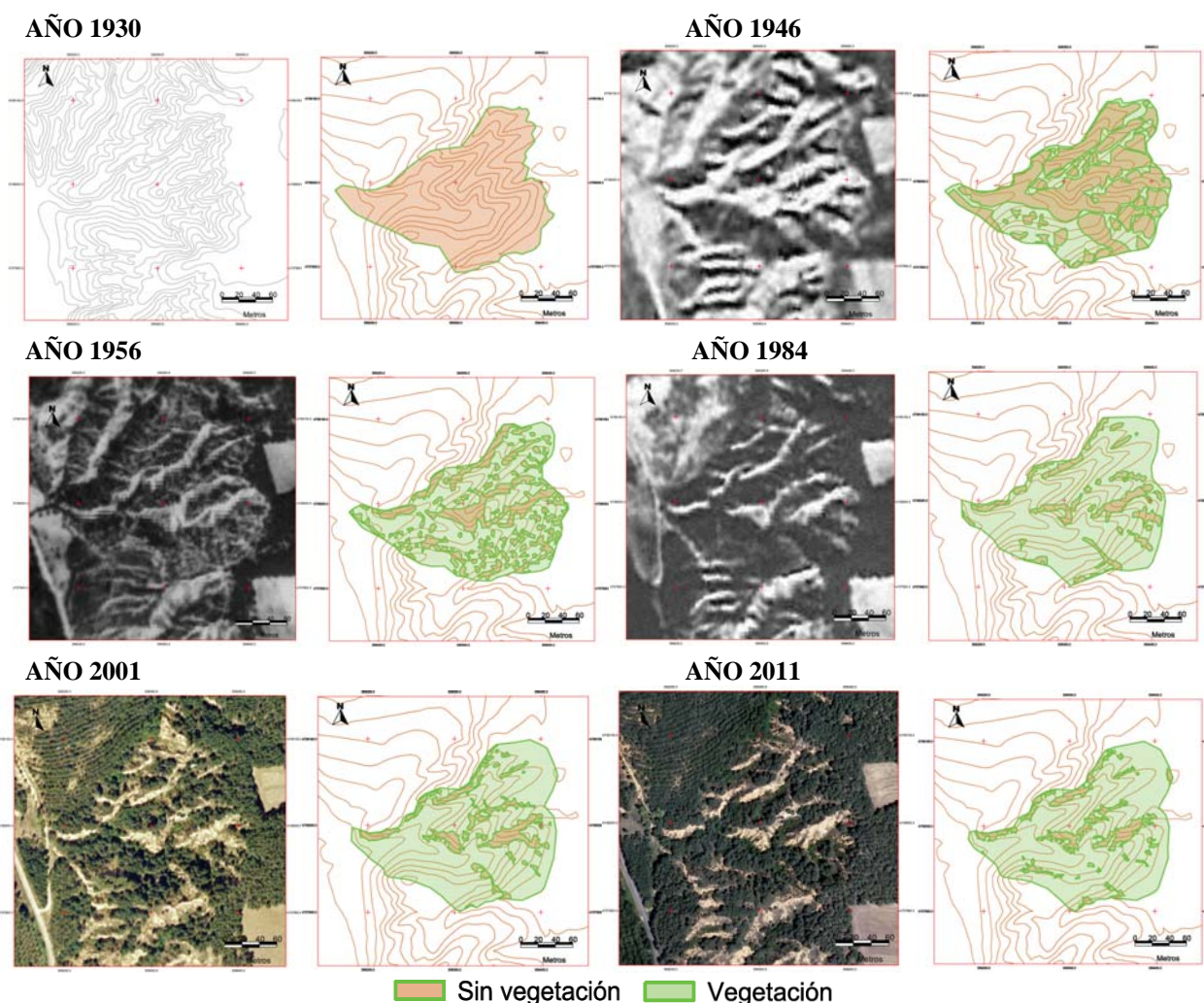


Figura 1. Evolución del perímetro, superficie y vegetación de la cárcava 20 establecida a partir de la interpretación de altimetrías, vuelos aéreos y ortofotos para la secuencia temporal establecida.

Tabla 2. Superficies (m^2), perímetros (m), variación anual en área ($m^2/año$), variación anual en perímetro ($m/año$) y tasa de retroceso (m) estimadas a lo largo de la secuencia temporal analizada para la cárcava 20.

Año	Área (S_i) (m^2)	Perímetro (p_i) (m)	Periodo (i)	Evolución área		Evolución perímetro		Retroc. $\Delta S_i/p_i-1$ (m)
				Diferencia (ΔS_i) (m^2)	Variación anual S_i ($m^2/año$)	Diferencia (Δp_i) (m)	Variación anual p_i ($m/año$)	
2011	27.650,82	718,08	2001-2011	+ 141,41	+ 14,14	+ 1,40	+ 0,14	0,20
2001	27.509,41	716,68	1984-2001	+ 264,53	+ 15,56	+10,59	+ 0,62	0,37
1984	27.244,88	706,09	1956-1984	+ 475,44	+ 16,98	- 18,94	- 0,68	0,66
1956	26.769,43	725,03	1946-1956	+ 207,92	+ 20,79	- 32,08	- 3,21	0,27
1946	26.561,52	757,11	1930-1946	+ 510,26	+ 31,89	- 12,95	- 0,81	0,66
1930	26.051,25	770,06	1930-2011	+ 1599,56	+ 19,75	+ 51,98	- 0,64	2,08

Se ha podido observar que la tasa aproximada de incremento medio de la cárcava 20 es de $19,75 m^2/año$ (periodo 1930-2011). Esta tasa registra valores más altos en los años iniciales correspondientes al estado anterior a la restauración y los primeros años tras la ejecución de la restauración hidrológica (hasta 1940) donde esta tasa de variación es de $31,89 m^2/año$ (Figura 7). En los últimos años, los efectos de los trabajos de restauración son patentes y se observa que la tasa de incremento de la cárcava toma valores mínimos de $14,14 m^2/año$. Los resultados muestran como desde 1984 hasta la actualidad el fenómeno erosivo está muy controlado (apenas varía $2,72 m^2/año$), y dado que en 1989 los diques se hallaban totalmente colmatados, suponemos que es a partir de 1984 cuando el aterramiento de los diques era total y realizaban funciones de contención de las laderas aledañas.

Respecto al análisis del retroceso medio de la cárcava se ha observado un valor total de 2 metros en unos ochenta años, lo que ofrece una variación de $2,5 cm \cdot año^{-1}$; en la última década el retroceso es de unos 20 cm, mientras que en el primer periodo tras la repoblación es de 66 cm. La oscilación en los periodos estudiados es muy similar, lo que se debe a que la cabecera de la cárcava es la zona aún sin revegetar y donde quedan restringidos los procesos erosivos actuales; aunque éstos son frenados por la masa forestal creada y que se halla bajo esta zona.

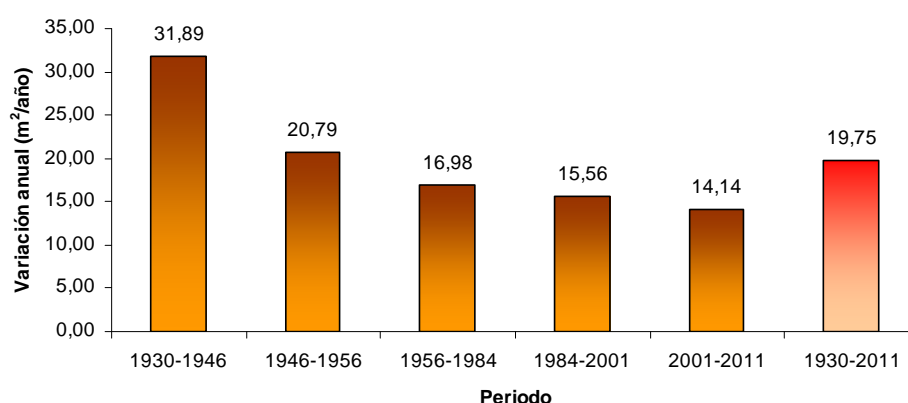


Figura 7. Variación anual en superficie ($m^2/año$) de la cárcava 20 para cada periodo estudiado.

El análisis del perímetro de la cárcava 20 presenta una evolución en la cual disminuye a medida que transcurre el tiempo. La tasa de variación del perímetro de la cárcava estimado a lo largo de los años analizados es de 0,64 m/año (media del periodo 1930-2011). Las mayores variaciones se dan en los años iniciales asociadas a procesos erosivos de magnitud más importante (Figura 8).

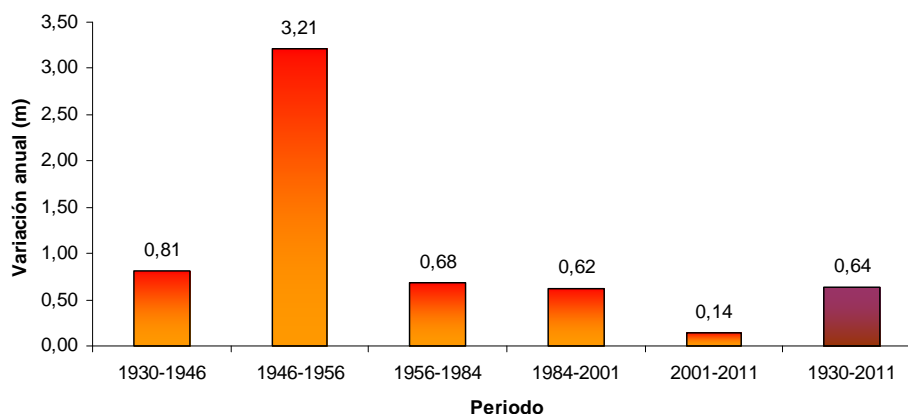


Figura 8. Variación anual en perímetro (m) de la cárcava 20 para cada periodo estudiado.

De forma similar se ha analizado la variación de la vegetación. Partiendo de la cartografía y fotografías del proyecto de restauración de 1930, se ha determinado como superficie ocupada el 0% (AYERBE, 1930); se ha analizado la superficie ocupada por la vegetación mediante la determinación de polígonos desocupados. Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en la Tabla 3. En ella se puede observar la superficie con y sin vegetación así como el porcentaje de la superficie de la cárcava 20 colonizado por la vegetación. Se puede observar como después de la finalización de los trabajos de restauración, unos 12 años después (1946) la superficie con vegetación es del 33,82%. Esta aumenta llegando a valores del 67,06% en 1956. Ya en 1984, se puede observar como el 84,78% de la superficie de la cárcava se encuentra colonizado por la vegetación lo que proporciona una buena cubierta protectora frente a los procesos erosivos. Este porcentaje varía muy poco 17 años después situándonos en valores del 86,11% (Figura 9).

Tabla 3. Superficies con vegetación (m²), sin vegetación (m²) y porcentaje de la superficie de la cárcava ocupado.

Año	Área (m ²)	Superficie descubierta (m ²)	Superficie con vegetación(m ²)	% Ocupado vegetación
2011	27.650,82	3.592,28	24.058,54	87,01
2001	27.509,41	3.821,02	23.688,39	86,11
1984	27.244,88	4.146,94	23.097,94	84,78
1956	26.769,43	8.819,01	17.950,42	67,06
1946	26.615,45	17.615,22	9.000,24	33,82
1930	26.051,25	26.051,25	0,00	0,00

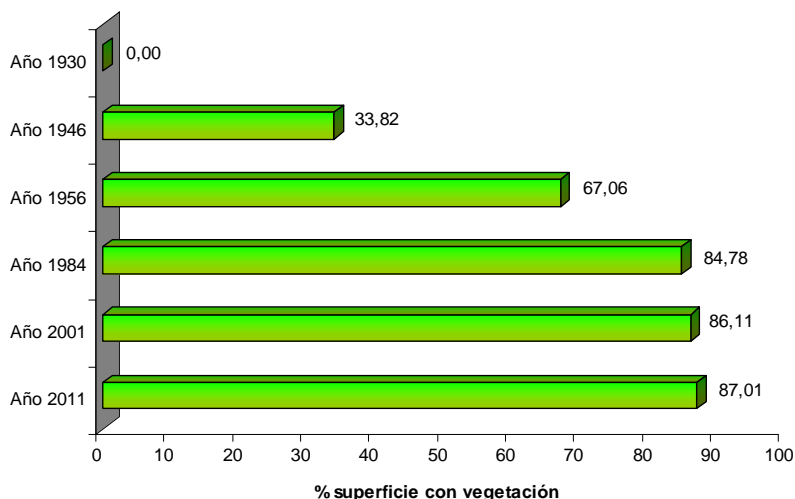


Figura 9. Evolución del % de superficie ocupada por la vegetación a lo largo del tiempo.

Actualmente, 81 años después de la redacción del primer proyecto de restauración hidrológico-forestal en la zona por AYERBE (1930) y 48 años después del proyecto complementario de restauración de AZCARRETAZÁBAL (1963), la superficie ocupada por la vegetación es del 87,01%. Analizando estos valores comprobamos como a partir de 1984 se produce una estabilización de la cubierta vegetal de la cárcava, presentando valores muy similares, ya que en este periodo de 28 años la vegetación apenas aumenta un 2,2%.

5. Discusión

El dato umbral de erosión real obtenido hasta 2011 (4,85 t/ha·año) refleja unas pérdidas de suelo ligeras a tenor de la clasificación establecida por FAO (1981), siendo similar para las pérdidas de suelo determinadas hasta la supuesta colmatación de los diques de 1984 (7,63 t/ha·año). STAMEY & SMITH (1965) establecen un valor de 5 t/ha·año como valor límite para pérdidas admisibles en suelos poco profundos y HUDSON (1971) valores de 2 t/ha·año para suelos muy erosionables. ARNOLDUS (1977) destaca que para suelos con profundidades de 25 cm la tasa de erosión no debe superar las 2 t/ha·año. Todos estos valores plantean que el resultado de erosión obtenido en nuestro caso es elevado y por encima de los límites de pérdidas admisibles.

Por otra parte, cabe destacar que los sedimentos retenidos no se corresponden con la totalidad del material erosionado ya que en la cuenca se vienen produciendo importantes deslizamientos en las partes altas cuyo material no llega a salir de la cuenca por el efecto barrera de la vegetación. Además al tratarse de diques permeables, hasta su fase de colmatación, una parte de las partículas más pequeñas (arcilla, limo fino) habrán atravesado el cuerpo de obra y no han sido retenidas en su totalidad. En la actualidad, los diques se encuentran totalmente colmatados por lo que, durante las últimas décadas y con lluvias elevadas, la capacidad de retención del dique es baja y la mayor parte de los sedimentos arrastrados desde las cabeceras, todavía desnudas, escapan por el vertedero. No obstante, esta circunstancia parece poco frecuente por los bajos caudales circulantes en la actualidad. La presencia de abundante musgo en los vertederos induce a pensar que prácticamente no existe un flujo significativo de caudal a través de los mismos y que la vegetación realiza un efecto notable en la reducción de escorrentía en las laderas.

Las tasas de erosión obtenidas, durante el periodo transcurrido hasta la colmatación, son de similar magnitud a las obtenidas por DÍAZ *et al.* (2012b) para la restauración hidrológico-forestal de Tortoles (Ávila) en cárcavas de sustrato arenoso y estimadas en $7,39 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Para regiones mediterráneas, ROMERO (2008) determina una tasa media de erosión de $3,95 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para la cuenca del río Quípar (Murcia) mediante la medición de los sedimentos retenidos por los diques. De forma similar BOIX-FAYOS *et al.* (2008) estiman una tasa media de erosión para la cuenca de la Rogativa (Murcia) de $5,39 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. También CASTILLO *et al.* (2007) obtienen un valor de $5,11 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en El Cárcavo (Murcia). La diferencia entre los resultados obtenidos en este estudio respecto a los calculados por estos autores se debe principalmente a que en su estimación de las tasas erosivas, asimilan las cuñas de sedimentos a prismas sencillos y en algún caso sin aterrizar. En nuestro estudio, al realizar un detallado levantamiento topográfico, es probable que se obtenga una mejor aproximación a las tasas reales de sedimentos retenidos y, por tanto, a las de erosión estimada, como así se indica en DÍAZ *et al.* (2012a).

El análisis de variación morfológica ha deparado valores medios anuales de incremento de $19,75 \text{ m}^2$ en superficie y $0,64 \text{ m}$ en perímetro. La tasa media de retroceso a lo largo del perímetro de la cárcava es de $2,5 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$. Como valores de referencia GÓMEZ *et al.* (2009b) estiman el incremento en el área afectada por acaravamiento para el periodo 1945-2006 a partir de la medición sobre ortofoto para una pequeña cuenca adhesionada del suroeste de España en $5,2 \text{ m}^2/\text{año}$. Si lo comparamos con el valor obtenido para nuestro caso comprobamos como la tasa de variación anual calculada toma valores altos en el área de estudio, lo que es síntoma de que el proceso erosivo ha sido muy notable y que aún sigue presente; pero son de pequeña magnitud frente a los obtenidos por MARTÍNEZ-CASASNOVAS y RAMOS (2009) en grandes cárcavas ($230 \text{ m}^2/\text{año}$). Otros valores contrastados son los obtenidos por MARTÍNEZ-CASASNOVAS y PORTA (1999) que estiman tasas de retroceso lineal de $0,2 \text{ m/año}$ en el periodo 1957-1993 para cárcavas en el Alt Penedès-Anoia o los de PERES y GARCÍA-HIDALGO (2006) de $0,23$ y $0,28 \text{ m/año}$ para cárcavas en Guadalajara; VICENTE *et al.* (2009) analizan la tasa de retroceso para cárcavas del Piedemonte en el norte del Guadarrama, en Segovia, y registra valores de $0,29 \text{ m/año}$ a $0,31 \text{ m/año}$ para las dos áreas de cárcavas que analiza. También caben destacar los obtenidos por LUNA *et al.* (2004), cuyos valores de retroceso varían de $0,21$ a $1,71 \text{ m/año}$ para grandes cárcavas en Granada. El hecho de que nuestras cifras sean más bajas que las aportadas por otros autores es difícil de justificar. En nuestro caso, la tasa de retroceso se obtiene distribuida entre todo el perímetro de la cuenca, mientras que en otros casos se refieren al avance de las cabeceras; pero también puede deberse a diferencias en la forma de cálculo de dichas tasas. No obstante, nuestros registros sí son del orden de magnitud de los calculados por MARTÍNEZ-CASASNOVAS y RAMOS (2009), para el periodo 1975-1995 en grandes cárcavas, y que alcanzan $0,08 \text{ m/año}$.

La superficie ocupada por la vegetación es del $87,01\%$, siendo su densidad alta (70-100%) según los valores establecidos para áreas acaravadas por BOIX-FAYOS *et al.* (2007). El papel de la vegetación está directamente relacionado con la producción de sedimentos a través del control del proceso erosivo. Diversos estudios han verificado que cuando la vegetación es mayor del 30% , en el lecho de las mismas, resultan casi inactivas (REY, 2003; HOOKE, 2006; MARTÍNEZ-CASASNOVAS *et al.*, 2009) o explican una baja erosión (CANTÓN *et al.*, 2001). En cárcavas de los Alpes, restauradas con *Pinus nigra*, tras 120 años, se han registrado tasas mínimas de $1 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ (VALLAURI *et al.*, 2002). Si analizamos

conjuntamente la variación morfológica (superficie de la cárcava) con la evolución de la vegetación podemos observar cómo los momentos de mayor tasa de variación anual se corresponden con los menores porcentajes de vegetación correspondientes al periodo 1930-1946. Además se observa como, a medida que aumenta la cobertura vegetal, se reduce la tasa anual de variación de la superficie de la cárcava, la cual se mantiene prácticamente constante desde 1984 hasta la actualidad. De ello se puede deducir que la erosión ha sido controlada a lo largo del tiempo según se desarrollaba la masa forestal, anulándose prácticamente el fenómeno erosivo significativo en torno a 1984.

6. Conclusiones

La efectividad de los diques forestales en la retención de sedimentos es un hecho, pues se constata que han acumulado un millar de toneladas entre 1930 y el momento actual. Esta labor de retención ha permitido obtener un umbral medio mínimo de las tasas de erosión en la zona de $7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ entre 1930 y 1984, lo que supone una pérdida grave de terreno desde el punto de vista de la formación y conservación del suelo. Por otra parte se ha detectado una fuerte disminución de las tasas de variación morfológica según se desarrollaba el pinar instaurado, tanto en superficie como en perímetro, para la cárcava modelo analizada. La retención de los sedimentos por los diques y la recuperación del bosque en una extensión superior al 80% han contribuido a la estabilidad hidromorfológica de la cuenca y su drenaje asociado, a la práctica desaparición de los fenómenos erosivos y a la transformación de un paisaje intensamente desertificado desde hace más de ochenta años.

7. Agradecimientos

A D. Luis José Ortiz Sanz y D. Francisco Javier Sanz Ronda por la ayuda prestada en los trabajos topográficos.

8. Bibliografía

- ARNOLDUS, H.M.J.; 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. FAO conservation Guide 1: 99-104.
- AYERBE, J.M.; 1930. Proyecto de restauración y repoblación de las laderas de la margen izquierda del río Carrión. Memoria y presupuesto. Servicio Forestal de la Confederación Sindical Hidrográfica del Duero. Valladolid.
- AZCARRETAZÁBAL, D.; 1963. Proyecto de repoblación forestal y restauración de las laderas de la cuenca del Carrión, fase 1ª. Memoria y presupuesto. Servicio Forestal de la Confederación Hidrográfica del Duero. Valladolid.
- BOIX-FAYOS, C.; BARBERÁ G.G.; LOPEZ-BERMUDEZ, F.; CASTILLO, V.M.; 2007. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: Case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorfology* 91: 103-123.
- BOIX-FAYOS, C.; DE VENTE, J.; MARTÍNEZ-MENA, M.; BARBERÁ, G.G.; CASTILLO, V.; 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol. Process.* 22: 4922-4935.
- CALVO-CASES, A.; BOIX-FAYOS, C.; ARNAU-ROSALEN E.; ROXO, M.J.; 2011. Cárcavas y regueros generados en suelos sódicos. Petrer (Alicante, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 37: 25-40.

- CANTÓN, Y.; DOMINGO, F.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J.; 2001. Hydrological and erosional response of a badlands system in semiarid SE Spain. *J. Hydrol.* 252: 65-84.
- CASANOVA, L.; 2002. Topografía Plana. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Vías. Venezuela.
- CASTILLO V.M.; MOSCH W.M.; CONESA, C.; BARBERÁ, G.G.; NAVARRO, J.A.; LÓPEZ, F.; 2007. Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena* 70: 416-427.
- CLOTET, N.; GALLART, F.; SALA, M.; 1987. Los badlands, características, interés teórico, dinámica y tasas de erosión. *Notes de Geogr. Fis.* 15-16: 28-37
- DÍAZ, V.; MONGIL, J.; NAVARRO, J.; 2012a. Efectividad de los diques forestales en la retención de sedimentos en la cabecera del río Corneja (Ávila). Propuesta metodológica. *Cuadernos de Investigación Geográfica* (pendiente de aceptación)
- DÍAZ, V.; MONGIL, J.; NAVARRO, J.; RAMOS, I.; 2012b. Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales. En: CONAMA; 2012. Cong. Nac. de Med. Amb.
- FAO; 1981. World soil charter. Food and Agriculture Organization. Roma.
- GÓMEZ, A.; SCHNABEL, S.; LAVADO, J.F.; 2009a. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degrad. Dev.* 20: 535-550.
- GÓMEZ, Á.; SCHNABEL, S.; SAN JOSÉ, J.J.; 2009b. Variación temporal de la erosión por cárcavas en los fondos de valle bajo explotación de dehesa. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 35 (2): 289-304.
- HOOKE, J.M.; 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology* 79: 311-335.
- HUDSON, N.W.; 1971. Soil conservation. Batsford. London.
- IGN; 2011. Modelo digital del terreno malla 5 metros de la hoja nº 164-III (Saldaña) Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- ITACyL; 2001. Ortofotografía aérea año 2001. (Hoja nº 164- II- IV). Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. Consejería de agricultura y ganadería, J.C. y L. Valladolid
- JARIEGO, A.; GÓMEZ, A.; LAVADO, F.; SCHNABEL, S.; PULIDO, M.; GARCÍA, R.; 2010. La fotografía aérea en España y su aplicabilidad al seguimiento y la estimulación de la erosión por flujo concentrado. En: OJEDA, J.; PITA, M.F.; VALLEJO, I.; (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla. 214-221. Sevilla.
- LUNA, E. DE; LAGUNA, A.M.; POESEN, J.; GIRÁLDEZ, J.V.; 2004. Evolución de un sistema de cárcavas activas en el sureste español. *Ingeniería del agua* 11: 65-73.
- MARTÍNEZ-CASANOVAS, J.A.; RAMOS, M.C.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, D.; 2009. Effects of landuse changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès Region (northeast Spain). *Earth Surf. Processes* 34: 1927-1937
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; FERNÁNDEZ, R.; SESEÑA, A.; MÉNDEZ, C.; DÍEZ, J.M.; NAVARRO, J.; VARELA, J.M.; 1997. Estudio para la elaboración de una metodología de análisis de la eficacia de obras transversales de corrección hidrológico-forestal ubicadas en escarpes de páramo. CEDEX. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; FERNÁNDEZ DE VILLARA, R.; SESEÑA, A.; MÉNDEZ, C.; DIEZ, J.M.; NAVARRO, J.; VARELA, J.M. 2002. Metodología para la inventariación de diques forestales gavionados. Aplicación en la provincia de Palencia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencia Forestal*, 13: 171-181.

- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; NAVARRO, J.; 1996. Hidrología forestal. El ciclo hidrológico. Secretariado de publicaciones Universidad de Valladolid. 286. Valladolid
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; 2007. When did gully erosion start to be accelerated in the Penedès-Anoia vineyard region (NE Spain)? Progress in Gully Erosion Reseach. Edis. Casali, J., Gimenez, R. Universidad de Navarra: 83-83.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RAMOS M.C.; 2009. Erosión por cárcavas y barrancos en el área de viña del Alt Penedès-Anoia (NE España). *Cuadernos de investigación geográfica* 35 (2): 223-238.
- MATHER, A.; STOKER, M.; GRIFFITHS, J.S.; 2002. Quaternary landscape evolution: A framework for understanding contemporary erosion, Southeast Spain. *Land Degrad. Dev.* 13: 89-109.
- MONGIL, J.; NAVARRO, J.; CRUZ, V.; DÍAZ, V.; 2012. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. IV Reun. Grup. Hª Forestal SECF. Oct. Vitoria.
- NAVARRO, J.; MONGIL, J.; DE ARAÚJO, J.C.; 2012. Desertificación secular de las cuevas de Saldaña (Palencia) frente a 80 años de restauración. IV Reun. Grup. Hª Forestal SECF. Oct. Vitoria.
- PERES, A.; GARCÍA-HIDALGO, J.F.; 2006. Morfología, procesos erosivos y evolución reciente en una cárcava cuaternaria: El barranco Haza de la Viña, Uceda (Guadalajara, España). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol.* 101: 41-50.
- RAMOS, I.; 2012. Control de sedimentos y evaluación morfológica de la cárcava nº 20 de Saldaña (Palencia) como consecuencia de su restauración hidrológico-forestal. TFC Ingeniero Técnico Forestal. E.T.S. de Ing. Agrarias. Univ. de Valladolid. Palencia. 300
- REY, F.; 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena* 50: 549-562
- ROMERO, A.; 2008. Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de investigación geográfica* 34: 83-99.
- STAMEY, W.L.; SMITH, R.M.; 1965. A conservation definition of erosion tolerante. *Soil Sci.* 93 (3): 183-196
- VALLAURI, D. R.; ARONSON, J.; BARBERO, M.; 2002. An analysis of forest restoration 120 years after reforestation on badlands in the Southwestern Alps. *Restor. Ecol.* 10 (1): 16-26
- VARELA NIETO, J.M.; (Dir) 1999. Inventario de obras de corrección hidrológico-forestal y de las variables ambientales relacionadas con las mismas. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Dirección General de Obras Hidráulicas.
- VICENTE, M.F.; SANZ, M.A.; LUCIA, A.; MARTÍN-DUQUE, J.F.; 2009. Evolución geomorfológica en tiempos históricos recientes de cárcavas del borde del piedemonte norte del Guadarrama (Segovia, España). Estudio a partir de fuentes documentales. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol.* 103 (1-4): 49-64.

PROPUESTA DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA EFECTIVIDAD DE LOS DIQUES EN LA RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

V. DÍAZ¹, J. MONGIL¹, J. NAVARRO²

¹Grupo de Hidrología y Conservación, Universidad Católica de Ávila, Canteros s/n 05005-Ávila, España.

²Unidad de Hidráulica e Hidrología, Universidad de Valladolid, Av. Madrid 44, 34004-Palencia, España.

RESUMEN. Los diques son estructuras transversales construidas en los cauces para mitigar la erosión, empleadas frecuentemente en España en proyectos de restauración hidrológico-forestal. Sus principales funciones son: controlar y retener los materiales sólidos transportados, estabilizar las laderas y los cauces torrenciales y reducir la velocidad del agua y consecuentemente su capacidad erosiva. No obstante, los efectos de los diques empleados en las restauraciones hidrológico-forestales para frenar la erosión son objeto de discusión en diversos estudios publicados en los últimos años. Con el fin de comprobar el grado de efectividad de los diques de gaviones en la retención de sedimentos se plantea una metodología basada en la estimación del volumen de la cuña mediante un levantamiento topográfico de detalle. Se ha comparado la metodología propuesta, que conlleva un exhaustivo y preciso trabajo de campo, con otras dos existentes, de uso frecuente y más simple elaboración. El procedimiento metodológico se ha aplicado a una cárcava situada en la cuenca del río Corneja, en Tórtoles (Ávila), donde se localiza una restauración hidrológico-forestal proyectada en 1964 y ejecutada en 1965. Se observa que los diques han conseguido retener un volumen de sedimentos de 237.95 m³, según la metodología planteada, lo que supone entre un 7.9 y un 30.3% superior al obtenido por las otras dos metodologías utilizadas. Los volúmenes unitarios de los diques, respecto a nuestra metodología, oscilan según el caso entre $\pm 5\%$ y $\pm 50\%$. Los resultados obtenidos con el método propuesto muestran una discrepancia con el resto, pero una mejor medición del volumen real de la cuña de sedimentos retenidos por los diques, lo cual justifica su empleo para la valoración de la efectividad de estas estructuras en el control de la erosión.

Proposal of a new methodology to assess the effectiveness of check-dams

ABSTRACT. Check dams are transverse structures that are built in some streams to mitigate erosion, and frequently used in forest-hydrology restoration projects in Spain. Their main functions are: controlling and retaining solid

particles transported by flow discharge; slope and bed stream stabilization; reducing flow water velocities and their erosivity. Nevertheless, the erosion control effectiveness of check dams is a matter under discussion during the last years. Because of this, we want to verify how the check dams work controlling sediment yields, and so on how they reduce soil losses in gullies. We propose a method based in estimating the sediment volume retained through an accurate topographical survey. Our results have been compared with two other methods, most frequently used because of their geometric simplicity. A significant variation appears between the three methods. Therefore, to probe the effectiveness of the check dams a better estimation of their sediment retained surface justifies the full topographical survey. We have worked in Tórtoles (Ávila, Spain), in a deep gully from the Corneja river headwaters. There is a forest-hydrological restoration that was projected in 1964 and executed one year later. The topographical survey results show that check dams in the gully have retained 237.95 m³ of sediments. This is a 30.3% and a 7.9% bigger than the calculated by the other two methods. The unit volumes of the check dams range between $\pm 5\%$ y $\pm 50\%$ respect the obtained with our method. Our results show important differences compared with the other methodologies, but a better land surveying justifies the use of the topographic method to estimate the check dams effectiveness.

Palabras clave: restauración hidrológico-forestal, hidrotecnia, conservación de suelos, cárcavas, badlands, diques de retención.

Key words: forest-hydrological restoration, hydrotechnic, soil conservation, gullies restoration, badlands, check dams.

Enviado el 26 de diciembre de 2012

Aceptado el 14 de mayo de 2013

*Correspondencia: Grupo de Hidrología y Conservación. Universidad Católica de Ávila. Canteros s/n 05005-Ávila, España. E-mail: virginia.diaz@ucavila.es

1. Introducción

Un dique es una estructura transversal construida en un cauce con la intención de mitigar y reducir la erosión del lecho y laderas (Hudson, 1982; Morgan, 1997; Chanson, 2004; Zeng *et al.*, 2009). La construcción de este tipo de estructuras ha sido una técnica empleada en los planes y programas de restauración hidrológico-forestal, en particular ampliamente utilizada en España y, principalmente, en el sureste de la Península Ibérica (Varela, 1999; Martínez-Lloris *et al.*, 2001; Martínez de Azagra *et al.*, 2002; Martín-Rosales *et al.*, 2003; Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2007, Romero *et al.*, 2007; Conesa y García, 2009; Conesa *et al.*, 2009, Castillo *et al.*, 2011). En estas zonas semiáridas, en las que la degradación de la cubierta vegetal y la torrencialidad de las precipitaciones originan procesos erosivos que dañan gravemente al suelo, el empleo de esta técnica es especialmente importante y necesario.

Las funciones que cumplen estas estructuras transversales y que justifican su empleo son múltiples, y han sido reseñadas por varios autores: controlan el transporte de sedimentos (Catella *et al.*, 2005); estabilizan las laderas y cauces torrenciales, gracias a la cuña de materiales aguas arriba del dique, que se interpone entre las dos laderas, impidiendo los movimientos en masa, como deslizamientos de fondo, socavación o hundimientos (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa y García, 2007; Romero, 2008); capturan, controlan, retienen y disminuyen el aporte de material sólido (Martín-Rosales *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Conesa y García, 2007; Romero, 2008); recargan los acuíferos, gracias al almacenamiento de agua en el vaso y el aumento de la carga hidrostática (Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa y García, 2007); disminuyen la velocidad del agua y por tanto su capacidad erosiva (Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Romero, 2008); retrasan el aterramiento de embalses y alargan su vida útil, al reducir la tasa de materiales que serían vertidos en el vaso del embalse (Gil, 2004; Belmonte *et al.*, 2005a; Romero, 2008); y controlan aludes, mediante su retención completa o parcial, evitando que se vean afectadas vías de comunicación, poblaciones o estaciones de esquí (Gil, 2004).

Sin embargo, algunos autores consideran que los diques de retención de sedimentos no siempre resultan necesarios ni efectivos (Marston y Dolan, 1999; Romero, 2008); otros analizan los riesgos que entrañan estas obras de corrección, sobre todo en áreas especialmente vulnerables (García-Ruiz *et al.*, 1996; Götz, 2001), e indican, como efectos negativos, que alteran la dinámica de los sedimentos y la estabilidad del lecho del cauce, interrumpen el movimiento longitudinal de nutrientes y organismos acuáticos, y obstruyen el paso de las olas de las inundaciones (Conesa, 2004; Wohl, 2006; Boix-Fayos *et al.*, 2008). Es necesario el estudio de cada caso para determinar la necesidad de su utilización, y considerar si se pudiera lograr el efecto deseado únicamente mediante el empleo de vegetación. Castillo *et al.* (2011) concluyen que, a largo plazo, los usos del suelo ejercen un mayor control de la producción de sedimentos que las obras hidráulicas, que son menos eficientes con el aumento de la cobertura vegetal. No obstante, ambas actuaciones –cambios en los usos del suelo y construcción de obras hidráulicas– pueden alterar el régimen hidrológico del cauce y su morfología, de forma que pueden llegar a anular los efectos beneficiosos conseguidos con la ejecución de estas obras (Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2007, 2011). Por tanto, en el corto plazo, la construcción de diques tiene efectos positivos para el control de los sedimentos (Martín-Rosales *et al.*, 2003), pero debe considerarse como una medida temporal, que debe ser acompañada con actuaciones de repoblación con especies fundamentalmente leñosas que ayuden a conseguir un control a largo plazo. De hecho, esta combinación de actuaciones tiene efectos positivos sobre la vegetación ribereña, de acuerdo con Bombino *et al.* (2006), que encuentran una diversificación longitudinal de los tipos de vegetación y la creación de nuevos hábitats para las comunidades biológicas y ecológicas. Así mismo, es necesario considerar la distinta repercusión de estas hidrotecnias en corrientes naturales y en zona de “badlands” o torrentes generados por una acción antrópica descontrolada. En este último caso, los diques intentan recuperar una morfología más parecida a la original antes de la intervención humana o al menos, si esto no fuera posible, disminuir la capacidad erosiva de los flujos torrenciales creados y reducir el elevado trans-

porte de sedimentos, por lo que sus efectos serían positivos. Por otra parte, si se construyen estas hidrotecnias sobre flujos casi permanentes, se debe tener en cuenta a la fauna ictícola y, por lo tanto, adoptar las medidas oportunas para evitar la fragmentación del hábitat.

Por último, los efectos de la retención de sedimentos y laminación de avenidas anteriormente señalados, conducen a una reducción de los riesgos de inundación de los núcleos de población que se sitúan aguas abajo de estas estructuras (Gil, 2004), incrementando el tiempo de concentración. Sin embargo, en ocasiones inducen una falsa idea de seguridad absoluta y se ubican edificaciones u otros usos no adecuados en los vasos o conos de deyección.

Dado el problema de la erosión y, particularmente, de la erosión en cárcavas, y que el estudio de los efectos de los diques empleados en las restauraciones hidrológico-forestales para frenarla ofrece conclusiones diversas según autores, el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para cuantificar el volumen real de sedimentos retenidos en los diques, mediante la medición precisa de la cuña de sedimentación, así como su aplicación a los diques de una cárcava situada en la restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila). Así mismo, se realiza un análisis comparativo respecto a las metodologías de Castillo *et al.* (2007) y Romero (2008).

2. Metodología

La metodología propuesta estima el volumen de la cuña de sedimentos que han sido retenidos en los diques de corrección hidrológica. En primer lugar es preciso realizar un levantamiento topográfico de la cuña y de su asiento originario. A partir de estas mediciones, con el empleo de cálculos analíticos y caracterización de los sedimentos, se obtiene la masa real, en toneladas, de los sedimentos que conforman la cuña. Con estos datos y conociendo los diques proyectados, su antigüedad, y la superficie de la cuenca vertiente al dique, se consigue obtener la erosión que los diques han retenido en la zona de estudio. En los siguientes párrafos se expone en detalle el desarrollo metodológico.

2.1. Estimación del lecho original

Consiste en realizar un levantamiento topográfico (mediante estación total o dispositivo GPS de precisión centimétrica) a partir de dos mediciones. Se toma una primera medición para delimitar el extremo final de la cuña de sedimentos. Esta cuestión puede resultar compleja, y precisa una observación detallada de los sedimentos, y en concreto de la diferencia de tamaño o granulometría del material sedimentado. Si la cuña termina con una determinada anchura, hay que ajustar estas mediciones a la forma observada (Fig. 1). La segunda medición consiste en realizar una sección transversal inmediatamente aguas abajo del dique (Fig. 2), tomando con la estación total o GPS, un punto cada 0.5 m. La estimación del lecho del cauce sobre el que se produjo la deposición de sedimentos tras la construcción del dique se consigue mediante la unión de cada uno de estos puntos con el punto o puntos tomados en la primera medición (Fig. 3).

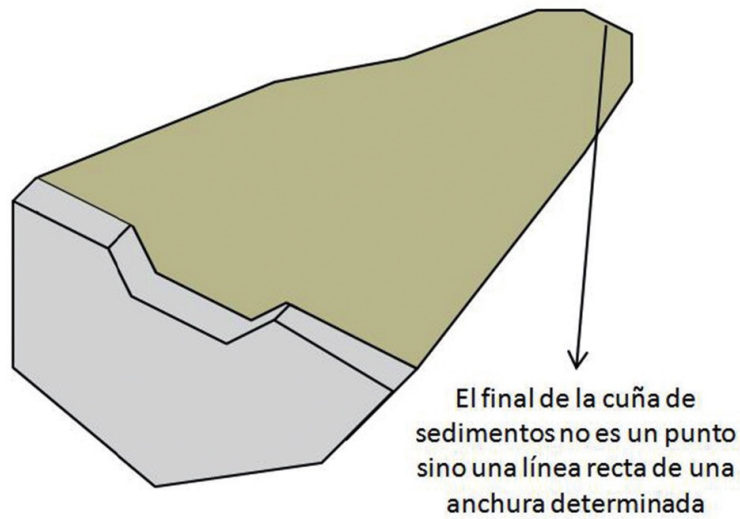


Figura 1. Cuña de sedimentos que no termina en un punto.

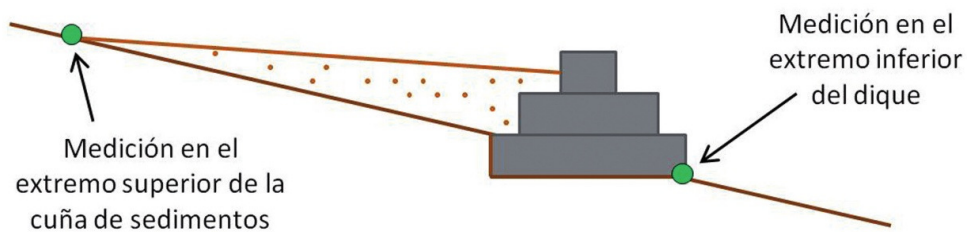


Figura 2. Mediciones a realizar, representadas en el perfil longitudinal de la cárcava.

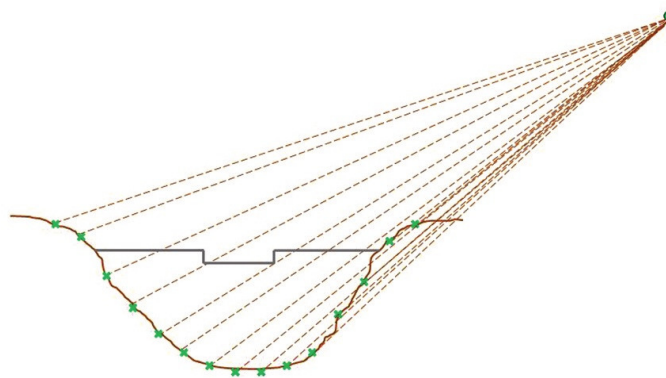


Figura 3. Resultado gráfico de la unión de las mediciones realizadas, obteniendo el lecho donde se asienta la cuña de sedimentos.

2.2. Medición de la cuña de sedimentos actual

Se basa en realizar un levantamiento topográfico de la cuña de sedimentos a través de secciones transversales, para obtener su superficie actual. La distancia entre una sección transversal y la siguiente varía de 0.5 a 3 m, en función de la longitud de la cuña. En cada sección se toma un punto cada 0.5 m, y también se toman mediciones adicionales a cada extremo de la cuña, para obtener la sección transversal de las laderas (Figs. 4 y 5).



Figura 4. Disposición de la estación total y de la cinta métrica para comenzar a levantar topográficamente una sección de la cuña de sedimentos.

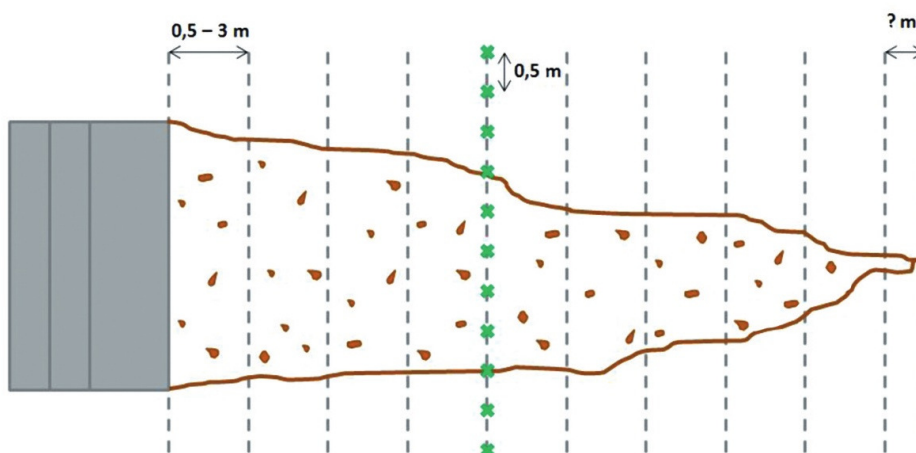


Figura 5. Vista en planta de las mediciones de las secciones transversales a la cuña de sedimentos.

2.3. Estimación del volumen de la cuña de sedimentación

Para determinar el volumen de la cuña de sedimentos, expresado en m^3 , se determina el área de cada sección transversal de la cuña, unificando en cada sección los datos anteriores. Para ello se aplica una metodología de cálculo analítico a través de cálculo matricial. Conocidas las áreas de cada sección transversal de la cuña, y la distancia entre las dos secciones transversales, se puede calcular el volumen parcial de cuña entre cada par de secciones (V_p), aplicando la fórmula del prismoide:

$$V_p = \frac{h}{6} \cdot (B_1 + B_2 + 4 \cdot B_m) \quad (1)$$

donde B_1 y B_2 son las áreas de las secciones 1 y 2, respectivamente (bases del prismoide), B_m es el área de la base media del prismoide, y h la distancia entre las bases del prismoide (Fig. 6). También se puede calcular el volumen parcial entre secciones empleando la fórmula de la media de las secciones extremas (V_{MSE}):

$$V_{MSE} = \frac{B_1 + B_2}{2} \cdot h \quad (2)$$

donde B_1 y B_2 son las áreas de las secciones 1 y 2, y h la distancia entre las bases. Sin embargo, la fórmula de la media de las secciones extremas ofrece resultados poco exactos, ya que considera que el área transversal varía linealmente con la longitud, de forma que un análisis comparativo indica que el cálculo del volumen aplicando la fórmula del prismoide ofrece una mayor precisión (Casanova, 2002).

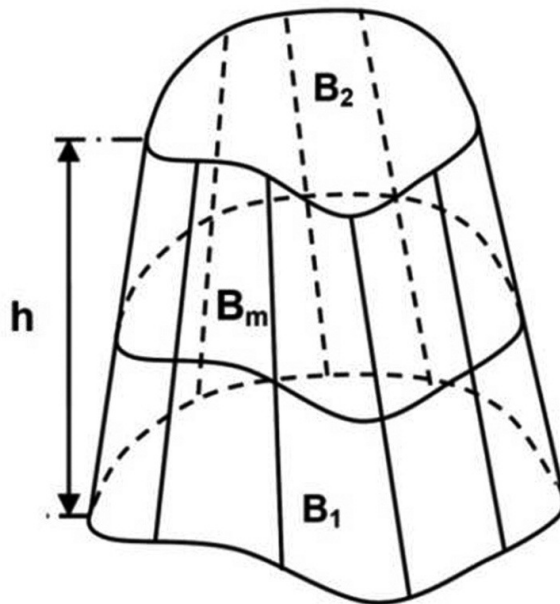


Figura 6. Cálculo de volúmenes entre secciones mediante la fórmula del prismoide.

Por último, el volumen de tierras entre dos secciones transversales consecutivas, siempre que éstas sean homólogas, también se puede calcular aplicando la fórmula de la sección media (V_{SM}), que asimila el sólido engendrado a un prisma de base la sección media (B_m):

$$V_{SM} = B_m \cdot h \quad (3)$$

donde h es la distancia entre las bases del prisma. Esta fórmula precisa una sección intermedia, por lo que únicamente se puede emplear entre secciones alternas.

Cuando se requiere una mayor precisión en el cálculo del volumen se recomienda utilizar la fórmula del prismoide (Casanova, 2002). Al utilizar las otras dos ecuaciones planteadas (media de las secciones extremas y sección media) en lugar de la del prismoide, se comete un error, que se determina mediante la diferencia entre los valores obtenidos por las fórmulas de la media de las secciones extremas y de la sección media con el valor obtenido por la fórmula del prismoide. Se cumple que el error cometido al aplicar la fórmula de la sección media (A_1) es la mitad y de signo contrario que el error cometido al utilizar la fórmula de la media de las secciones extremas (A_2).

No obstante, hay que tener en cuenta la morfología del dique, ya que cuando una parte de éste quede aterrada, por ejemplo cuando el paramento aguas arriba es escalonado, se debe restar el volumen del dique que queda aterrado, ya que en caso contrario se estaría cometiendo un error de sobredimensionamiento del volumen final de sedimentos.

Por último, para determinar el volumen total de la cuña de sedimentos, se suman las cantidades obtenidas en el paso anterior.

2.4. Estimación de la erosión

Una vez determinado el volumen de sedimentos retenidos y la densidad aparente de los sedimentos, aplicando el método del cilindro, se obtiene el peso estimado de materiales retenidos en la cuña de sedimentación. Con estos datos, conociendo la fecha de construcción del dique y la superficie de aporte de sedimentos se estima el umbral mínimo de erosión (E), en toneladas por hectárea y año, aplicando la ecuación:

$$E = \frac{P}{T \cdot S} \quad (4)$$

siendo P el peso, en toneladas; T el tiempo transcurrido desde la construcción de la hidrotecnia, medido en años; y S la superficie en hectáreas de aporte de sedimentos.

2.5. Metodologías planteadas por otros autores

Otros autores como Castillo *et al.* (2007) y Boix-Fayos *et al.* (2008) asemejan el volumen de sedimentos retenido aguas arriba del dique a un prisma con sección rectangular, basándose en los estudios de Lien (2003) y May y Gresswell (2003), que consi-

deran que las ramblas suelen formar cauces con sección transversal en U. Sin embargo, esta aproximación supone una forma geométrica que no se ajusta a la realidad en cauces diferentes a los estudiados por estos autores. Como datos toman únicamente la anchura, profundidad y longitud de la cuña. Castillo *et al.* (2007) señalan que, sin embargo, en zonas montañosas, y con pequeños arroyos tributarios, se observa una sección transversal con forma de V. En éstos, la anchura media de la cuña de sedimentos (w) se estima como la media entre el ancho del canal en la sección aguas abajo del dique (w_b), y la anchura media de la cuña de sedimentación (w_s). El volumen de sedimentos almacenados aguas arriba de los diques se estima aplicando la fórmula:

$$V = \frac{w \cdot l_s \cdot h}{2} \quad (5)$$

donde w es la anchura media del canal relleno de sedimentos, l_s es la longitud de la cuña de sedimentos, y h es la altura de los sedimentos medidos desde la base del dique (Fig. 7).

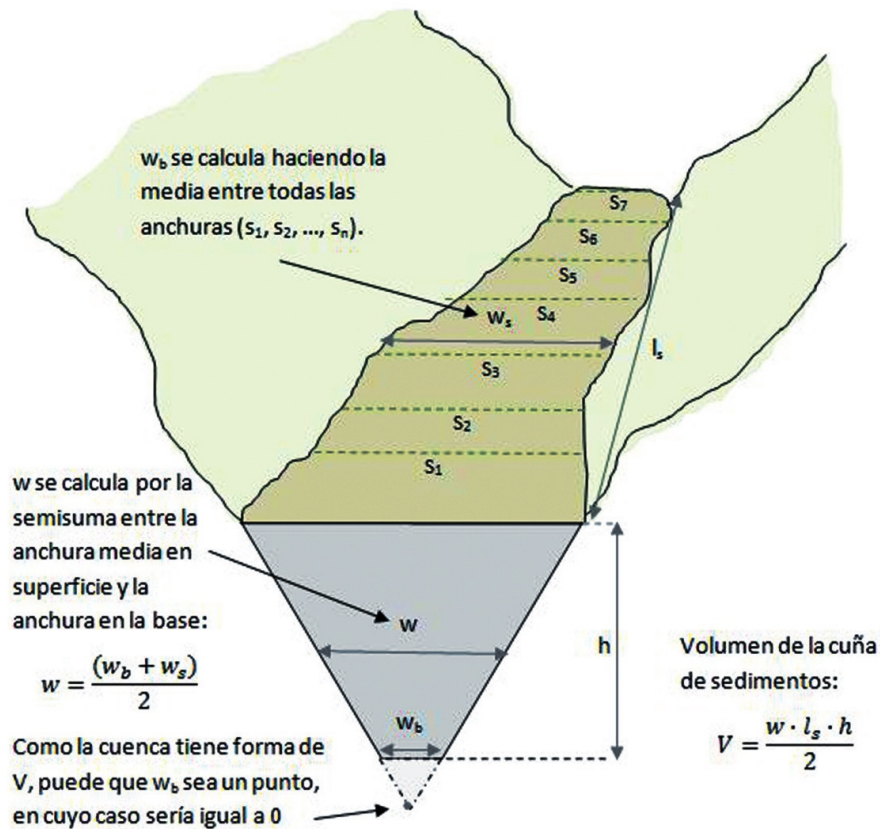


Figura 7. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Castillo *et al.* (2007). S_i =anchura de la cuña en la sección transversal i ; w_s =anchura media de la cuña de sedimentación (calculado como la media de las anchuras de la cuña en las secciones transversales i); w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; w =anchura media del canal relleno de sedimentos; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; l_s =longitud de la cuña de sedimentos.

Por último, Romero (2008) asocia el volumen de la cuña de sedimentos con una pirámide de base trapezoidal en posición horizontal, figura geométrica que considera más parecida a la forma tridimensional de los sedimentos acumulados en el dique. De esta manera, la ecuación que utiliza para el cálculo del volumen de sedimentos en los diques es la del volumen de la pirámide de base trapezoidal (V), delimitada por la superficie de los sedimentos sobre el dique:

$$V = \frac{B \cdot H}{3} \quad (6)$$

donde B es el área de la base coincidente con el dique, y H la longitud de la cuña de sedimentos (Fig. 8). Esta estimación supone que el extremo de la cuña termina en un punto, y no en todos los casos es así, de forma que también se simplifica bastante al generalizar el uso de esta fórmula para cualquier cuña. Por ello, se hace necesaria una metodología que mejore la precisión y se aproxime más a la realidad, mediante mediciones más detalladas y representativas.

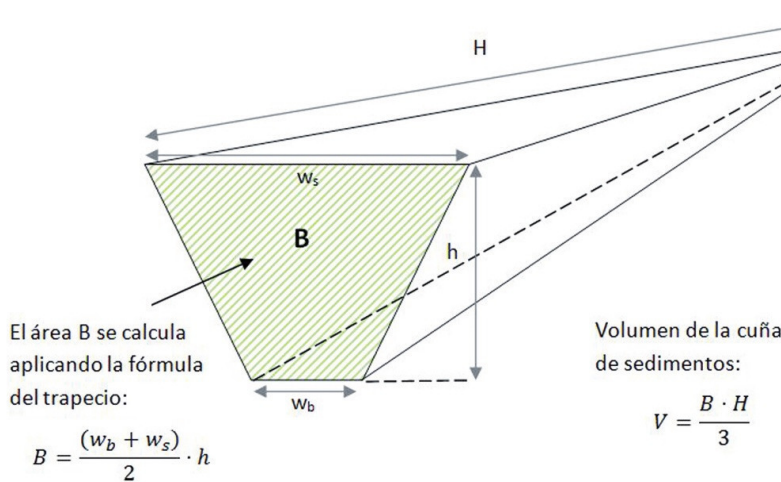


Figura 8. Cálculo del volumen (V) de la cuña de sedimentos siguiendo la metodología propuesta por Romero (2008). w_s =ancho de la base del dique en la sección aguas arriba de éste; w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; B =área de la base coincidente con el dique; H =longitud de la cuña de sedimentos.

3. Metodología utilizada en este estudio

3.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza en Tórtoles (Coordenadas UTM: 308 563, 4 492 536; huso 30, datum ETRS89), municipio de la provincia de Ávila, situado en el Sistema Central, al sur de la Cuenca del Duero, subcuenca del Tormes, en pleno valle del río Corneja (Fig. 9). La precipitación anual media es de 571 mm y la temperatura media anual 10.6°C. Los materiales geológicos que afloran son fundamentalmente plutónicos, tratándose en general de monzogranitos biotíticos porfídicos de grano grueso (IGME, 2008), que presentan un aspecto meteorizado y alterado, formando bolos y canchales. Los suelos resultantes son Orthents y Xerepts (USDA, 2010), con cerca de un 70% de

arena, textura desde franco-arcillo-arenosa a arenosa y pH alrededor de 6. Las laderas y barrancos de Tórtoles estaban sometidas a un estado de degradación severo, causado principalmente por mantener las tierras sin arbolado para facilitar el pastoreo (Mongil *et al.*, 2012). Dado su estado, esta zona fue objeto de un proyecto de restauración hidrológico-forestal redactado en 1964 (Azcarretazábal, 1964), que contemplaba la repoblación con diversas especies de pinos de 428.41 ha de cuencas de pequeños torrentes y arroyos tributarios del río Corneja, en altitudes comprendidas entre 1 100 y 1 500 m. La repoblación resultó exitosa, con espesuras medias actuales que rondan los 2 800 pies ha⁻¹. Así mismo se proyectó la construcción de 313 diques forestales de gaviones, de los que tras un exhaustivo inventario se han localizado 123, que se han clasificado en cuatro modelos, con alturas que varían entre 1 y 6 m, y en los que se utilizaron gaviones de base, con una altura de 0.5 m (Martín-Vide, 2002). Gracias al menos en parte a estas actuaciones, el embalse de Santa Teresa, construido en 1960 y situado en el río Tormes a corta distancia de la desembocadura del Corneja, no ha visto mermada su capacidad por el aporte de sedimentos procedentes de los torrentes de esta zona.

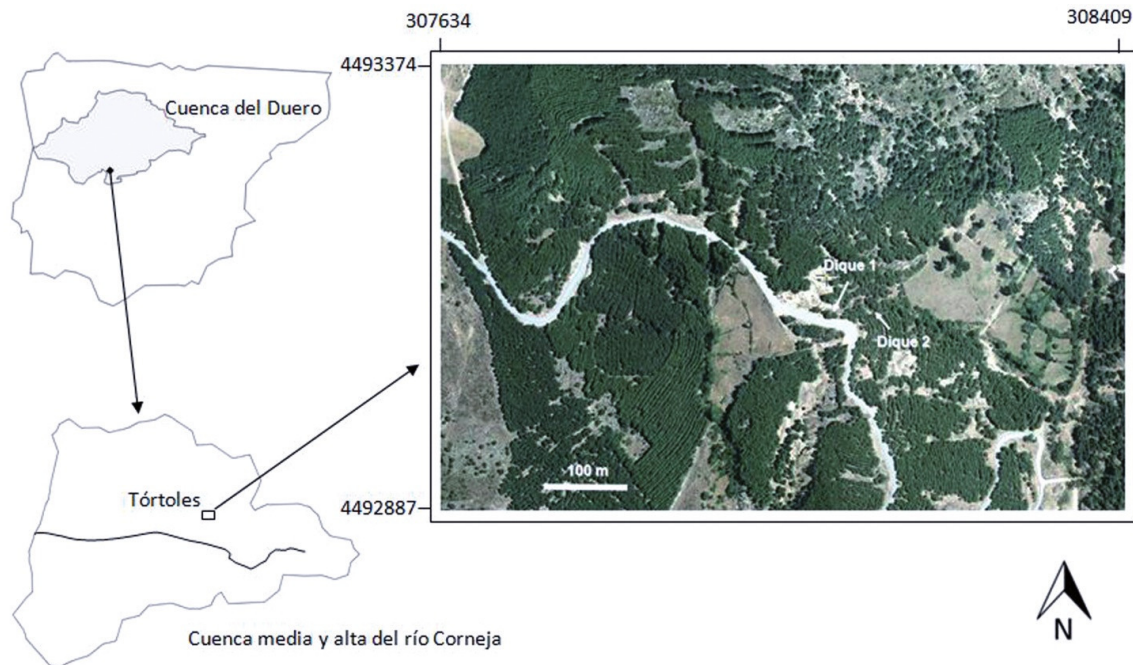


Figura 9. Localización del área de estudio y situación de los diques muestreados.

Este estudio se ha centrado en una cárcava de 109 m de longitud, 14 m de anchura media y 15% de pendiente longitudinal.

3.2. Estimación del lecho original

La metodología propuesta se ha aplicado a una cárcava en la que se construyeron dos diques de gaviones y se han medido las dos cuñas de sedimentos de la forma que se expone a continuación. El dique 1 es de 9.8 m de longitud y 7 pisos de gaviones, y el dique 2 es de 17.8 m de longitud y 8 pisos de gaviones; ambos con vertedero y gaviones de 0.5 m de altura.



Figura 10. Cuña de sedimentos del dique 1.



Figura 11. Cuña de sedimentos del dique 2.

Se ha estimado el lecho original sobre el que se asientan cada una de las dos cuñas existentes en la cárcava seleccionada, mediante la medición de sus extremos superiores, y de la sección transversal inmediatamente aguas abajo de cada dique, como definitiva del cauce antes de la construcción de los diques. En los dos casos, las cuñas terminan en un único punto final, como se puede observar en las Figs. 10 y 11.

3.3. Medición de la cuña de sedimentos actual

La cuña del dique 1 (el situado más aguas arriba), mide 28.08 m de longitud, tiene una anchura máxima de 9 m y una pendiente media del 17%, y se ha medido a través de 10 secciones transversales, distanciadas 3 m entre sí, y el punto final, situado a 1.08 m de la sección 10. En cuanto a la cuña del dique 2 (situado aguas abajo del anterior), de 31.00 m de longitud, 12.00 m de anchura máxima y pendiente media del 14%, se ha medido a través de 11 secciones transversales, distanciadas igualmente 3 m, y el punto final está situado a 1 m de la sección 11.

En cada una de las secciones transversales se han ido tomando puntos de derecha a izquierda, considerando que las secciones avanzan de aguas abajo a aguas arriba, hasta terminar en el punto final. Por este orden, se han tomado dos puntos iniciales correspondientes a la pendiente natural de las laderas colindantes a la cuña, a 2 y 1 m respectivamente del comienzo de ésta; a continuación se han tomado los puntos correspondientes a la cuña, distanciados 0.5 m entre sí, excepto el último punto, cuya distancia del anterior depende de la anchura de la cuña en cada sección; y por último, dos puntos correspondientes a las laderas en la margen izquierda de la cuña, distanciados 1 m entre sí y con respecto al último punto correspondiente a la cuña de sedimentos.

3.4. Estimación del volumen de la cuña de sedimentación

Con los datos obtenidos de la estimación del lecho original sobre el que se asienta la cuña de sedimentos, se han obtenido las cotas de los puntos coincidentes con cada una de las secciones transversales tomadas en la superficie de la cuña, de forma que para cada una de éstas se obtiene un polígono delimitado por el cauce estimado en su parte inferior, y por la superficie de la cuña en su parte superior. En ocasiones ha sido necesario realizar una estimación adicional para que el polígono quede cerrado, con ayuda

de la pendiente obtenida de las laderas. Aplicando cálculo matricial se ha determinado el área de cada uno de estos polígonos correspondiente a cada sección transversal; por tanto, 10 polígonos del dique 1 y 11 polígonos del dique 2.

A continuación se ha determinado el volumen entre cada par de secciones aplicando la fórmula del prismoide, la fórmula de la media de las secciones extremas, y la fórmula de la sección media. En este último caso utilizando secciones alternas para disponer de una sección intermedia con el que aplicar la fórmula. Además, se ha determinado el error cometido en cada uno de los diques en la aplicación de las fórmulas, tomando como referencia la fórmula del prismoide. De acuerdo con Casanova (2002), se ha considerado que la fórmula del prismoide ofrece el valor más preciso.

Por último se han sumado, en cada dique, los volúmenes entre secciones obtenidos en la aplicación de la fórmula del prismoide, para obtener el volumen total de cada cuña de sedimentos.

3.5. Estimación de la erosión

Se ha estimado la densidad aparente de los sedimentos retenidos en cada hidrotecnia utilizando el método del cilindro, tomando dos muestras por cuña. Aplicando la densidad aparente al volumen de la cuña de sedimentos se obtiene la masa total de los materiales sedimentados en cada dique.

Por otra parte, se han consultado los años transcurridos desde la construcción del dique, que se corresponden con los años durante los cuales se ha producido la retención de sedimentos, mediante la consulta del proyecto ejecutado (Azcarretazabal, 1964). Por último, se ha estimado la superficie de aportación de sedimentos a cada hidrotecnia mediante la delimitación de la divisoria sobre el plano topográfico a escala 1:5000 y con el apoyo de la ortofotografía aérea. La superficie de aportación conjunta para ambos diques es de 1.02 ha. Con este dato, se ha estimado la cantidad de sedimentos retenida por los diques, en $\text{tha}^{-1} \text{año}^{-1}$.

3.6. Comparación del resultado obtenido con otras metodologías

Se han comparado los resultados obtenidos aplicando el método expuesto, y los obtenidos con las fórmulas de Castillo *et al.* (2007), considerando un perfil del cauce en forma de V, y de Romero (2008), que asemeja la cuña de sedimentos a una pirámide trapezoidal en posición horizontal.

4. Resultados y discusión

Siguiendo la metodología propuesta, se ha estimado el lecho original partiendo de la sección transversal inmediatamente aguas abajo de cada dique (Fig. 12) y el extremo superior de cada cuña. Con esta estimación y con la superficie de la cuña levantada en cada una de las secciones transversales, se ha medido el área encerrada por cada una de ellas mediante ajustes gráficos siguiendo las pendientes reales o, en su defecto, estimadas de las laderas del cauce (Fig. 13). A través de cálculo analítico se ha obtenido el área

superficial de cada una de las secciones transversales en ambos diques (Tabla 1). Posteriormente se han aplicado las fórmulas del prismoide, de la sección media y de la media de las secciones extremas, para determinar el volumen total de sedimentos retenidos. Los errores A_1 y A_2 , obtenidos de la aplicación de las fórmulas señaladas han sido muy bajos en ambos casos (Tabla 2). No obstante, es necesario restar del volumen total estimado el perteneciente a la parte del dique que se encuentra aterrado bajo la cuña de sedimentos. El volumen obtenido mediante la metodología propuesta (en adelante caso A) es 135.92 m^3 de sedimentos retenidos por el dique 1 y 102.03 m^3 por el dique 2. Una vez obtenido el volumen de sedimentos retenidos, y utilizando la densidad aparente media de los sedimentos de la cuña (1.49 t m^{-3} en la cuña 1 y 1.42 t m^{-3} en la cuña 2), se obtiene que la masa estimada de sedimentos retenidos en la cuña es 202.24 t en el caso del dique 1 y 144.41 t en el caso del dique 2 (Tabla 2). Esta masa de sedimentos se ha ido depositando desde que se construyeron los diques, de forma que el periodo de sedimentación hasta la toma de datos en el levantamiento topográfico ha sido de 46 años. De esta manera se obtiene una tasa de erosión media en la cárcava para la metodología propuesta (caso A) de $7.39 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Tabla 2).

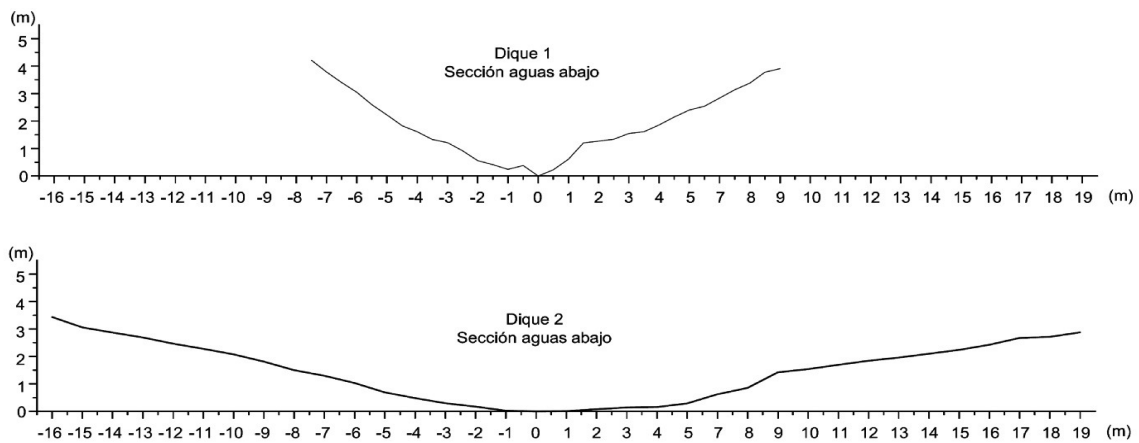


Figura 12. Sección transversal inmediatamente aguas abajo del dique 1 (arriba) y del dique 2 (abajo), a partir de las cuales se estiman los cauces originales.

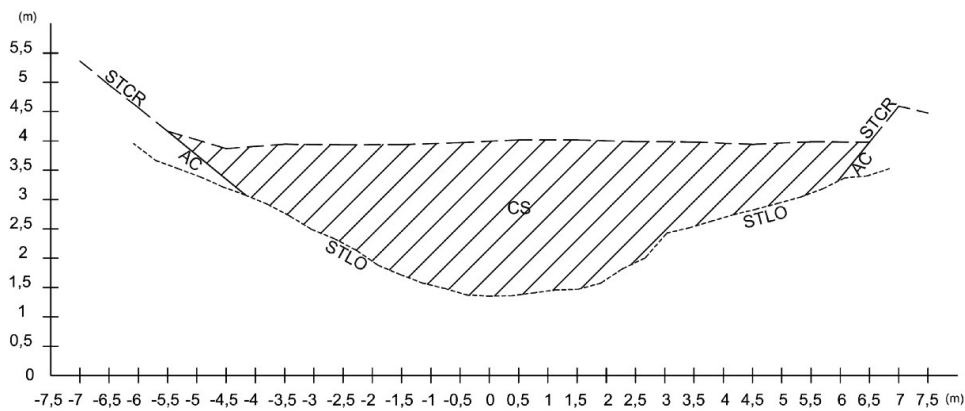


Figura 13. Sección transversal 1 del dique 2. STCR=sección transversal del cauce real; CS= cuña de sedimentos; AC= ajustes del cauce; STLO= sección transversal del lecho original.

Tabla 1. Área superficial (m^2) de las secciones transversales de la cuñas de sedimentos retenida por los diques 1 y 2.

DIQUE 1		DIQUE 2	
Sección	Área (m^2)	Sección	Área (m^2)
1	15.7560	1	18.9883
2	17.2871	2	15.4948
3	12.0941	3	12.2943
4	6.9608	4	9.3101
5	6.7444	5	6.4574
6	5.1621	6	4.1691
7	3.0442	7	2.5895
8	1.9827	8	0.9464
9	0.9725	9	0.9727
10	0.3111	10	0.4291
-	-	11	0.1830

Tabla 2. Aplicación de las fórmulas del prismoide (V_p), de la media de las secciones extremas (V_{MSE}) y de la sección media (V_{SM}) para obtener el volumen de sedimentos, errores obtenidos de su aplicación, pisos de gaviones y volumen de dique aterrados, volumen final de la cuña de sedimentos retenidos por los diques, densidad aparente media (Da), masa de sedimentos (M_S) y erosión cuantificada para ambos diques (caso A).

	DIQUE 1	DIQUE 2
V_p (m^3)	187.37	186.03
V_{MSE} (m^3)	186.85	186.84
V_{SM} (m^3)	188.42	184.40
Error A_1 (%)	-0.28	0.44
Error A_2 (%)	0.56	-0.88
Nº PISOS DE GAVIONES ATERRADOS	6	7
$V_{DIQUE ATERRADO}$ (m^3)	51.45	84.00
$V_{CUÑA}$ (m^3)	135.92	102.03
Da ($t \cdot m^{-3}$)	1.4879	1.4154
M_S (t)	202.24	144.41
Erosión ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	7.39	

Aplicando la metodología de Castillo *et al.* (2007) (en adelante caso B) (Tabla 3), se obtiene un volumen de $120.15 m^3$ en el dique 1 y $181.20 m^3$ en el dique 2, que tras descontar en cada caso la parte del dique aterrada bajo la superficie de la cuña de sedimentos, resulta un volumen de $68.70 m^3$ y $97.20 m^3$, respectivamente. Con este volumen, la tasa de erosión (caso B) es de $5,11 t ha^{-1} año^{-1}$.

Tabla 3. Parámetros empleados y resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta por Castillo et al. (2007) (caso B).

Ancho	DIQUE 1	DIQUE 2		DIQUE 1	DIQUE 2
S_1	9.00	12.00	w_s	5.71	6.68
S_2	9.80	10.98	w_b	0.00	0.00
S_3	8.50	11.50	w	2.85	3.34
S_4	6.38	9.50	h	3.00	3.50
S_5	6.10	7.50	l_s	28.08	31.00
S_6	5.25	7.50	V_B	120.15	181.20
S_7	4.29	4.00			
S_8	3.20	2.00			
S_9	2.61	3.50			
S_{10}	1.92	3.00			
S_{11}	-	2.00			

S_i =anchura de la cuña en la sección transversal i ; w_s =anchura media de la cuña de sedimentación (calculado como la media de las anchuras de la cuña en la secciones transversales i); w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; w =anchura media del canal relleno de sedimentos; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; l_s =longitud de la cuña de sedimentos; V_B =volumen de la cuña de sedimentos obtenido de la aplicación de la fórmula de Castillo et al. (2007).

Al aplicar la metodología propuesta por Romero (2008) (en adelante caso C), con los valores de los parámetros que se muestran en la tabla 4, se obtiene un volumen de 137.59 m³ en el dique 1 y 217.00 m³ en el dique 2. A estos valores se descuenta la parte del dique aterrada bajo la superficie de la cuña de sedimentos, resultando un volumen de 86.14 m³ y 133 m³, respectivamente. Con este volumen, la tasa de erosión (caso C) es de 6.74 t ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 4. Parámetros empleados y resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta por Romero (2008) (caso C).

	DIQUE 1	DIQUE 2
w_s	9.80	12.00
w_b	0.00	0.00
h	3.00	3.50
B	14.70	21.00
H	28.08	31.00
V_C	137.59	217.00

w_s =ancho de la base del dique en la sección aguas arriba de éste; w_b =ancho de la base del dique en la sección aguas debajo de éste; h =altura de los sedimentos medidos desde la base del dique; B =área de la base coincidente con el dique; H =longitud de la cuña de sedimentos; V_C =volumen de sedimentos obtenido de la aplicación de la fórmula de Romero (2008)

Tabla 5. Tiempo empleado en trabajo de campo, volumen y masa de la cuña de sedimentos, y valores de erosión para ambos diques, obtenidos de la aplicación de las distintas metodologías.

	CASO A		CASO B		CASO C	
	DIQUE 1	DIQUE 2	DIQUE 1	DIQUE 2	DIQUE 1	DIQUE 2
TIEMPO (h)	3.00	3.25	1.63	1.75	0.94	1.00
VOLUMEN (m ³)	135.92	102.03	68.70	97.20	86.14	133.00
MASA (t)	202.24	144.41	102.22	137.58	128.17	188.25
EROSIÓN (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	7.39		5.11		6.74	

En la tabla 5 se realiza una comparación de resultados para cada dique y en cada uno de los casos indicados (A, B y C), incluyendo el tiempo empleado para su aplicación. En el caso A (metodología propuesta), se ha estimado una media de 15 minutos por sección transversal más 15 minutos dedicados a estacionamiento y colocación de cinta métrica, y en los casos B y C, los tiempos estimados dependen del número de parámetros que es necesario medir en campo, y se ha considerado un tiempo medio de 5 minutos por parámetro.

El tiempo empleado (Tabla 5 y Fig. 14) es notablemente superior en el caso A que en los otros dos casos, concretamente un 46% más que el caso B y un 69% más que el caso C. Se trata por lo tanto de un inconveniente para la utilización de la metodología propuesta, salvo que la precisión justificara un mayor coste en tiempo y dinero. Aunque en los tres métodos se estima la forma de la cuña de sedimentos en su parte más profunda, que apoya sobre el antiguo lecho, a este respecto la metodología propuesta es geoméricamente más ajustada que las otras dos, y contempla un mayor número de mediciones de campo que, además, son más detalladas y representativas. Así mismo, la metodología propuesta estima el lecho original del cauce (cárcava o barranco) partiendo la proyección de la sección de aguas abajo del dique, proporcionalmente hacia aguas arriba, en conjunción con la proyección de las laderas según su pendiente actual. Esta estimación resulta más aproximada que una proyección puramente geométrica, en concreto un canal prismático de sección rectangular (Castillo *et al.*, 2007) y una pirámide de base trapezoidal (Romero, 2008), ya que intenta acomodarse al perfil natural del terreno. El equipo de medición empleado también es importante, aunque las metodologías en sí no varían. Así, una estación total o un GPS de precisión centimétrica ofrecen valores de suficiente exactitud, mientras que un GPS con errores superiores al metro no es recomendable.

El cálculo del volumen de sedimentos (Tabla 5) ofrece resultados diferentes dependiendo de la metodología y del dique medido. Haciendo un análisis para cada dique (Fig. 15), el volumen de sedimentos retenidos por el dique 1 es un 49.5% mayor en el caso A que en el caso B y un 36.6% mayor que en el caso C; y para el dique 2, el volumen es en el caso A un 4.7% mayor que en el caso B y un 30.4% menor que en el caso C. Considerando conjuntamente los dos diques, se ha conseguido retener un volumen de tierra de 237.95 m³, según la metodología planteada, lo que muestra la importancia de

esas obras en el control de la erosión, por lo que se considera necesario replantearse los resultados de métodos más simples. Este valor supone un 30.3% y un 7.9% superior, respectivamente, al obtenido por las otras dos metodologías estudiadas. Al contabilizar el volumen en conjunto de los dos diques se compensan las diferencias entre las metodologías, dado que estas diferencias son positivas en unos casos y negativas en otros y eso parece inducir que los resultados finales de las diferentes metodologías son comparables, aunque realmente no sea así.

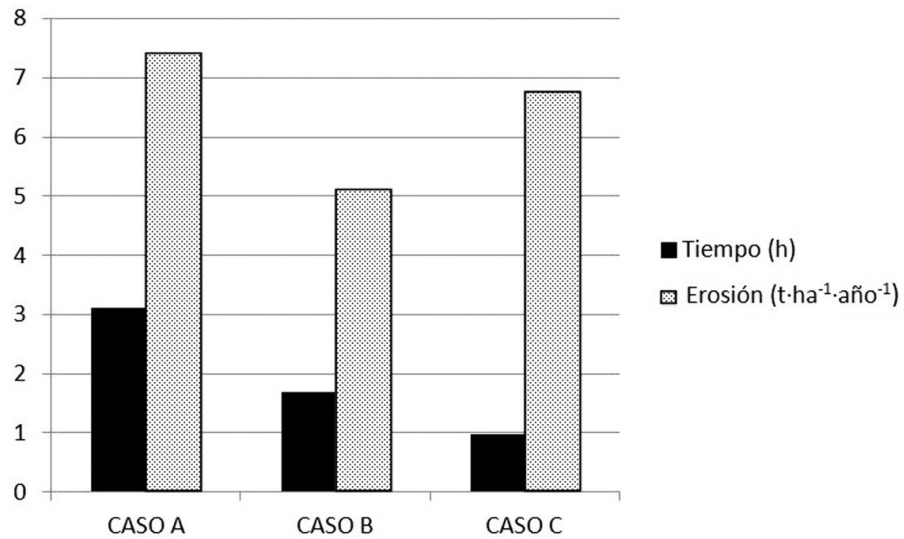


Figura 14. Erosión obtenida mediante las distintas metodologías (casos A, B y C), y tiempo empleado en aplicarlas.

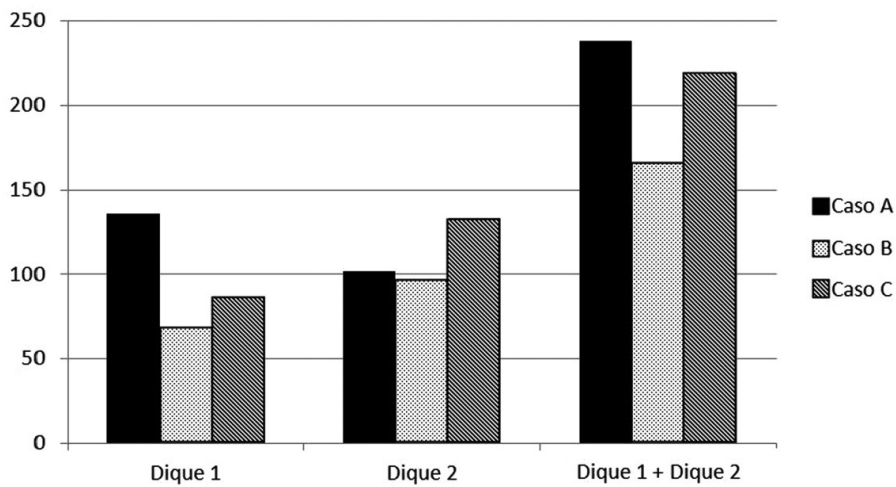


Figura 15. Volumen de sedimentos retenidos (m³), según las diferentes metodologías.

Si se observan los resultados de erosión ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) (Tabla 5 y Fig. 14), expresados en valores conjuntos para ambos diques, las estimaciones son similares para las tres metodologías comparadas, con una diferencia entre el mayor valor (caso A) y el menor (caso B) de $2.28\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$. El resultado obtenido por la metodología propuesta es superior a las otras dos, más próximo a la metodología de Romero (2008). A este respecto hay que señalar lo dicho ya para los volúmenes, y es que al analizar los resultados conjuntos de erosión para ambos diques, las diferencias que son de distinto signo se compensan, por lo que puede darse una falsa sensación de que los resultados de las tres metodologías son comparables.

Finalmente hay que decir que las cifras obtenidas de erosión media son sólo un umbral mínimo, pues los diques no retienen la totalidad de los sólidos en suspensión, por lo que una buena parte de los limos y las arcillas se han escapado fuera de la cuenca. Fifield (2004) indica que la eficiencia de las estructuras de retención de sedimentos en obras con movimiento de tierras es siempre menor del 100%; Makusic (2007) ha obtenido con trampas de sedimentos una eficiencia creciente del 37% al 99% según es mayor el periodo de retorno usado para su diseño. Sin embargo, la porosidad de los gaviones hace que las tasas habituales de retención de sedimentos aplicados no sirvan de referencia. Martín-Rosales *et al.* (2003) han obtenido un coeficiente de retención del 35% en diques de gaviones en la Sierra de Gádor con diversos episodios de lluvia. Romero *et al.* (2012), empleando la fórmula de “trap efficiency” de Brown (1943), han obtenido valores que varían entre 42.3% y 83.9% de eficiencia en la retención de sedimentos, con una tasa media de sedimentos de $1.7\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, para 18 diques de gaviones y de hormigón construidos en la Cuenca del río Quípar (Murcia) en los años 1962 y 1996. Por otra parte, se ha tomado como referencia temporal el periodo de 46 años que va desde la ejecución de la restauración (1965) hasta la fecha en que se hicieron las mediciones (marzo de 2011); sin embargo, es posible que, aunque no se ha encontrado referencia documental al respecto, la ejecución del proyecto se retrasara, o que las cuñas de sedimentos se terminaran de formar hace años, es decir, que los diques ya estuvieran aterrados antes de medir las cuñas. En cualquiera de estos casos el tiempo de cálculo se reduciría, con lo que los valores de erosión media aumentarían.

5. Conclusiones

Se propone una metodología que, a la vista de los resultados, se considera adecuada para medir la cuña de sedimentación retenida en los diques de corrección hidrológica, y de esta forma cuantificar sus efectos en la retención de la erosión. No obstante, la metodología sólo se ha aplicado a una cárcava en la que se sitúan dos diques, por lo que los resultados obtenidos deben tomarse con cautela, siendo necesario aplicar la metodología a un mayor número de diques, trabajo que se está realizando en este momento. Sin embargo, se observa que el tiempo empleado en aplicar la metodología propuesta es bastante más elevado que en otras metodologías, y esto puede ser un inconveniente en función de los objetivos perseguidos. Este trabajo muestra que las metodologías más sencillas pueden ser empleadas como primeras aproximaciones, pero dadas las diferencias que muestran incluso entre ellas mismas, no pueden utilizarse para argumentar o con-

traargumentar la eficacia de las obras transversales. Para ello es necesario establecer una metodología suficientemente aproximada a la realidad del proceso a cuantificar. La metodología propuesta recaba un mayor número de datos de campo reales sobre la naturaleza superficial de las cuñas que otras metodologías, por lo que el volumen de sedimentos obtenido se aproxima más al volumen real de sedimentos retenidos en la cuña, ya que se cuenta con un elemento geométrico de cálculo medido de manera precisa. Por consiguiente, es de esperar un menor error que en metodologías menos detalladas y, por tanto, una mejor interpretación del papel de estas estructuras transversales.

El volumen de sedimentos obtenido de la aplicación del método planteado a una cárcava concreta permite estimar valores de erosión moderados (según la clasificación de FAO-PNUMA-UNESCO, 1980) respecto a las tasas tolerables para terrenos agrícolas, aunque son elevadas para las tolerables en la formación de suelos; pero estos datos son una aproximación al umbral mínimo de erosión, ya que los diques no son capaces de retener la totalidad de sedimentos removidos de una cuenca y no existe información sobre el momento exacto de su aterramiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de investigación P0001/2011 del convenio UCAV-Caja de Ávila. Los autores agradecen a la Dra. Eunice Maia de Andrade (Universidade Federal de Ceará, Brasil) la revisión del original.

Referencias

- Azcarretazábal, D. 1964. *Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca río Corneja. Tramo I. Término municipal de Tórtoles*. Confederación Hidrográfica del Duero, Ministerio de Obras Públicas.
- Belmonte, F., Romero, A., Martínez-Lloris, M. 2005a. Erosión en cauces afectados por obras de corrección hidrológica (Cuenca del Río Quípar, Murcia). *Papeles de Geografía* 41-42, 71-83.
- Belmonte, F., Romero, A., Martínez-Lloris, M. 2005b. Impactos ambientales asociados a la construcción de obras de corrección hidrológica en la Cuenca del río Quípar (Sureste de España): apertura de caminos de acceso. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 31, 97-106.
- Boix-Fayos, C., González, G., López-Bermúdez, F., Castillo, V. 2007. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of The Rogativa Catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology* 91, 103-123.
- Boix-Fayos, C., de Vente, J., Martínez-Mena, M., Barberá, G.G., Castillo, V. 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrological Processes* 22, 4922-4935.
- Bombino, G., Tamburino, V., Zimbone, S.M. 2006. Assessment of the effects of check-dams on riparian vegetation in the mediterranean environment: a methodological approach and example application. *Ecological Engineering* 27, 134-144.
- Brown, C.B. 1943. Discussion of sedimentation in reservoirs. En *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 69, J. Witzig (ed.), American Society of Civil Engineers, pp. 1493-1500.

- Casanova, L. 2002. *Topografía Plana*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de vías, Venezuela.
- Castillo, V., Mosch, W., Conesa, C., González, G., Navarro Cano, J.A., López-Bermúdez, F. 2007. Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena* 70, 416-427.
- Castillo, V., Boix-Fayos, C., de Vente, J., Martínez-Mena, M., González, G. 2011. Efectos del aumento de la cubierta vegetal y los diques de corrección en la producción de sedimentos de cuencas mediterráneas. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 32, 153-158.
- Castella, M., Paris, E., Solari, L. 2005. Case study: Efficiency of slit-check dams in the Mountain region of Versilia Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145-152.
- Chanson, H. 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 495 pp.
- Conesa, C. 2004. Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. *Nimbus* 13-14, 125-132.
- Conesa, C., García, R. 2007. Litofacies de relleno y modelo de sedimentación de los diques de retención en el tramo inferior de la Rambla del Cárcavo (Cuenca del Segura). *Cuaternario y Geomorfología* 21 (3-4), 77-100.
- Conesa, C., García, R. 2009. Local scour estimation at check dams in torrential streams in south east Spain. *Geografiska Annaler* 91 A (3), 159-177.
- Conesa, C., Arana, R., García, R. 2009. Variación granulométrica y mineralógica en profundidad de los sedimentos retenidos por diques. Estudio en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular. *Nimbus* 23-24, 61-88.
- FAO-PNUMA-UNESCO 1980. *Metodología provisional para la degradación de los suelos*. Roma.
- Fifield, J. S. 2004. *Designing for Effective Sediment and Erosion Control on Construction Sites*. Forester Communications Inc., Santa Barbara, 290 pp.
- García-Ruiz, J.M., White, S., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P., Gómez-Villar, A. 1996. *La catástrofe del Barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal*. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Zaragoza, 54 pp.
- Gil, R. (Coord.) 2004. Restauración hidrológico-forestal: Pasado, presente y futuro. *VII Congreso Nacional de Medio Ambiente*, Madrid, 73 pp.
- Götz, A. 2001. *Flood Protection: A Common Goal for Federal Cantonal and Municipal Authorities*. Federal Office for Water and Geology.
- Hudson, N. 1982. *Conservación del suelo*. Reverté, Barcelona, 350 pp.
- IGME 2008. *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 529: Santa María del Berrocal*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Lien, H.P. 2003. Design of slit dams for controlling stony debris flow. *International Journal of Sediment Research* 18, 74-87.
- Makusic, M.S. 2007. *Effects of Design Changes on Sediment Retention Basin Efficiency*, NC State Theses and Dissertations. Disponible en: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/1938>.
- Marston, R.A., Dolan, L.S. 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial pattern of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology* 31, 313-323.
- Martín-Rosales, W., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Vallejos, A. 2003. Sediment yield estimation and check dams in a semiarid area (Sierra de Gádor, southern Spain). En *Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques*, IAHS Publ. 279, 51-58.
- Martín-Vide, J.P. 2002. *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC, Badalona, 404 pp.
- Martínez de Azagra, A., Fernández, R., Seseña, A., Méndez, C., Díez, J.M., Navarro, J., Varela, J.M. 2002. Metodología para la inventariación de diques forestales gavionados. Aplicación

- en la provincia de Palencia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 13, 171-181.
- Martínez-Lloris, M., Romero, A., Alonso, F. 2001. Respuesta erosiva de cuencas, corregidas mediante diques de retención de sedimentos, ante lluvias de alta intensidad. Cuenca del río Quípar, sureste de España. *Papeles de Geografía* 34, 191-203.
- May, C., Gresswell, R. 2003. Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon coast range, USA. *Earth Surface Processes Landforms* 28, 409-424.
- Mongil, J., Navarro, J., Cruz, V., Díaz, V. 2012. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. En *Reunión del Grupo de Historia Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, Vitoria.
- Morgan, R.P.C. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 343 pp.
- Romero, A. 2008. Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 34, 83-99.
- Romero, A., Martínez-Lloris, M., Belmonte, F., Hernández, E. 2003. La Cuenca del Río Quípar (región de Murcia): Una cuenca modelo para el estudio de utilidad de los diques de retención de sedimentos en el control de la erosión y en la recarga de acuíferos. *Nimbus* 11-12, 89-105.
- Romero, A., Alonso, F., Martínez-Lloris, M. 2007. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena* 71, 172-178.
- Romero, A., Marín-Sanleandro, P., Ortiz-Silla, R. 2012. Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena* 99, 42-53.
- USDA 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Disponible en: <http://soils.usda.gov/technical/classification>
Fecha de acceso: 02/9/2012.
- Varela, J.M. (Dir) 1999. *Inventario de obras de corrección hidrológica-forestal de las variables ambientales relacionadas con las mismas*. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas, Dirección General de Obras Hidráulicas.
- Wohl, E. 2006. Human impacts to mountain streams. *Geomorphology* 79, 217-248.
- Zeng, Q.L., Yue, Z.Q., Yang, Z.F., Zhang, X.J. 2009. A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia Stream, China. *Environmental Geology* 58, 897-911.

Topographical surveying for improved assessment of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badlands restoration site (Central Spain)

Virginia Díaz · Jorge Mongil · Joaquín Navarro

Received: 10 October 2013 / Accepted: 31 July 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract

Purpose The effects of check dams used in restoration projects have been discussed in a number of papers in recent years. This paper studies the effectiveness of retaining sediments from check dams constructed in the badlands restoration site of Tórtoles, located in the Corneja River basin (Spain), using a new topographical method.

Materials and methods In order to assess the sediment-retaining capacity of the check dams, we measured the volume of sediment trapped by 15 of the 123 check dams built in 1965. We carried out a detailed topographical survey using a Total Station, with an accuracy of ± 1 cm, to measure cross sections of the sediment trapped by each check dam. The results were then compared with those of two simplified methods which consider the volume of retained sediment as a simple geometric figure.

Results and discussion According to our results, 258 m³ of sediment has been retained by the check dams. These results show a significant discrepancy between the topographical method and the two other methods, whose values are consistently lower (14 to 20 %). According to our survey, the mean value for the volume of sediment retained by each check dam is 17.23 m³, versus 13.86 and 14.74 m³ when applying the other methods. Although there is a strong correlation between the volume of retained sediment computed by the topographical method and the other two methods (r^2 from 0.96 to 0.94), the differences between them increase with the increasing size

of the check dams. Therefore, total differences are expected to be more significant with larger check dams. The erosion rates, calculated on the basis of the retained sediment in the Tórtoles check dams, are 16–21 % lower when using the simpler methods. The bed slopes of the streams were reduced 12.44 % because of the presence of the check dams.

Conclusions After having completed a more detailed topographical survey of the sediment trapped in the check dams, our results are more likely to estimate erosion rates and sediment yield correctly, thus leading to a better understanding of the effects of check dams on badlands restoration.

Keywords Erosion control · Gully restoration · Sediment yield · Soil conservation · Trap efficiency

1 Introduction

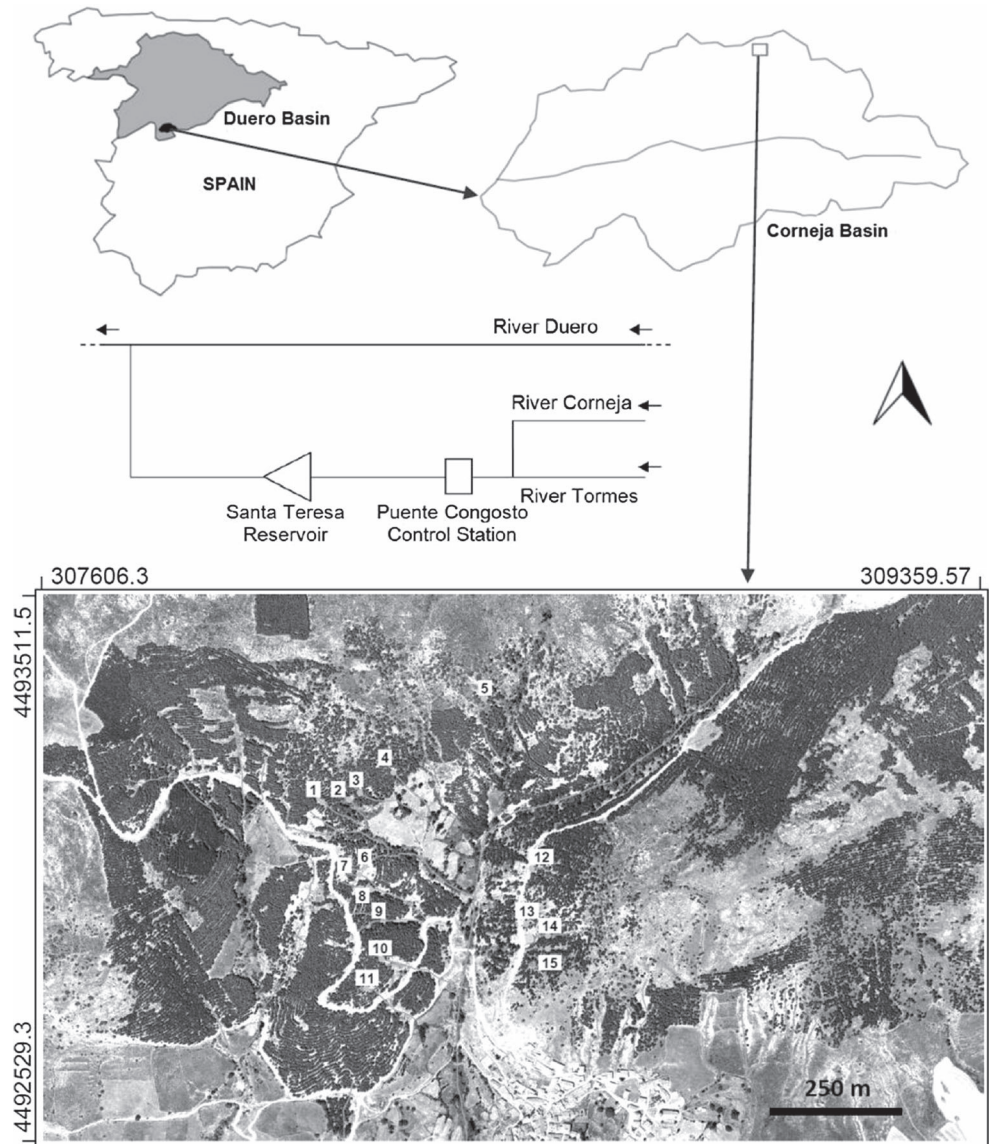
Building check dams to retain sediments in watersheds is a method commonly used together with land reforestation in forest hydrological restoration projects throughout the world (Boardman 1995; Bazoffi et al. 1996; Sichingabula 1997; Lloyd et al. 1998; Verstraeten and Poesen 1998; Bombino et al. 2009; Huang et al. 2009; Zeng et al. 2009). The benefits of check dams have been reported by several authors. These transversal structures capture and retain sediments, thereby reducing their transport out of the watersheds (Martin-Rosales et al. 2003; Catella et al. 2005; Conesa and García 2007; Romero 2008; Huang et al. 2009; Luan et al. 2010). They thus slow down the silting of reservoirs, thereby extending their useful life (Castillo et al. 2007; Romero 2008). Check dams also decrease the velocity of water discharge and its erosivity (Bombino et al. 2008; Zeng et al. 2009) and contribute to the stabilization of hillslopes and torrential stream beds as the wedge of sediments accumulated behind the check

Responsible editor: José Carlos de Araújo

V. Díaz (✉) · J. Mongil
Hydrology and Conservation Research Group, Catholic University of Ávila, Canteros s/n, 05005, Ávila, Spain
e-mail: virginia.diaz@ucavila.es

J. Navarro
Agricultural and Forestry Engineering Department, University of Valladolid, 34004 Palencia, Spain

Fig. 1 Location of the study area (UTM coordinates: zone 30T, datum ETRS89) and the location of the 15 check dams, the Santa Teresa Reservoir and the Puente Congosto Control Station



dams prevents landslides, washouts, and ground subsidence (Conesa and García 2007; Romero 2008).

Some recent studies have evaluated the sediments retained by check dams to reveal how these structures control erosion (Castillo et al. 2007; Romero et al. 2007; Sougnez et al. 2011).

Following their studies, Castillo et al. (2007) and Boix-Fayos et al. (2008) considered the sediment retained behind the check dams to be like a prism with a rectangular section, as torrential Mediterranean streams (*ramblas*) present a “U” channel cross section (Lien 2003; May and Gresswell 2003). However, this

Fig. 2 **a** 1964. Degraded area before restoration. **b** 2013. Pine forest on the hillslopes of the area, 50 years after the restoration



Table 1 Main characteristics of the selected check dams

Check dam no.	UTM X	UTM Y	Length (m)	Effective height (m)	Total height (m)	Sediment depth(m)	Spillway	Wedge length (m)	Drainage area (m ²)	Original slope (%)	Modified slope (%)
1	308112	4493133	11.70	1.57	2.15	1.43	Yes	6.30	1,517.30	32.99	20.25
2	308161	4493137	3.90	1.80	2.25	1.80	Yes	5.70	724.03	35.44	24.95
3	308181	4493150	15.50	1.25	1.60	1.25	Yes	5.80	858.35	27.12	14.88
4	308242	4493187	18.55	0.68	0.68	0.68	No	4.50	1,062.96	32.18	27.76
5	308409	4493322	10.00	3.58	3.83	3.23	Yes	6.70	3,079.95	39.94	15.39
6	308190	4493019	15.60	1.19	1.50	1.19	Yes	5.20	999.05	21.71	7.10
7	308180	4493001	12.10	1.65	2.20	1.55	Yes	6.70	606.34	27.00	16.33
8	308200	4492973	16.80	1.39	1.99	1.39	Yes	3.00	916.97	34.80	21.47
9	308207	4492929	9.00	3.28	3.83	3.21	Yes	5.80	341.27	44.81	21.95
10	308221	4492846	7.55	0.99	0.99	0.99	No	2.92	476.13	34.66	24.49
11	308192	4492792	11.25	2.39	2.80	2.39	Yes	11.50	490.56	27.30	13.68
12	308496	4493011	12.90	1.80	1.80	0.60	No	6.00	4,337.19	24.19	23.30
13	308486	4492910	7.60	1.59	1.59	0.99	No	2.92	1,178.36	24.54	11.82
14	308526	4492889	9.90	2.25	2.75	1.73	Yes	7.20	4,635.59	29.52	23.89
15	308526	4492864	15.40	2.75	3.30	3.50	Yes	5.10	6,704.38	39.92	22.22

consideration is a geometric simplification that may not be applicable to other kinds of streams. Romero et al. (2007) consider the three-dimensional geometric shape of the sediment wedge retained by a check dam to be more of a horizontal pyramid with a trapezoidal base. In any case, these simple methods underestimate the sediment volume retained by each check dam and hence its sediment retention effectiveness. In order to gain a better understanding of the efficiency of check dams in retaining sediments, Díaz et al. (2014) present a methodology based on a topographical survey and a calculation process matrix to obtain a better estimation of the sediment retained by check dams and of their effectiveness.

In this paper, we use the topographical method to obtain the volume of sediment retained by check dams in a more accurate way. We also compare this method with other simpler methods to determine how the type of method influences the estimation of erosion rates and sediment yields. If erosion rates and sediment yields are better estimated, the function of check dams could be better understood. We thus evaluate

the volume and weight of the sediment retained by 15 selected check dams in a forestry restoration site located in Ávila, Central Spain, to quantify the sediment retention effectiveness of check dams and estimate the erosion rate in the area. Furthermore, we estimate the sediment yield downstream from the restoration area and analyze some of its effects on water quality, the aquatic ecosystem, and hydraulic infrastructure. Applying the topographical method proposed by Díaz et al. (2014) in the study area, we show how it could be used in many other areas to study the effectiveness of check dams used in other badlands restoration projects.

2 Materials and methods

2.1 Study area

The study was carried out within the Corneja River basin, on the right bank of the River Tormes, which is a tributary of the

Fig. 3 Front view of check dams nos. 15 (left) and 14 (right)



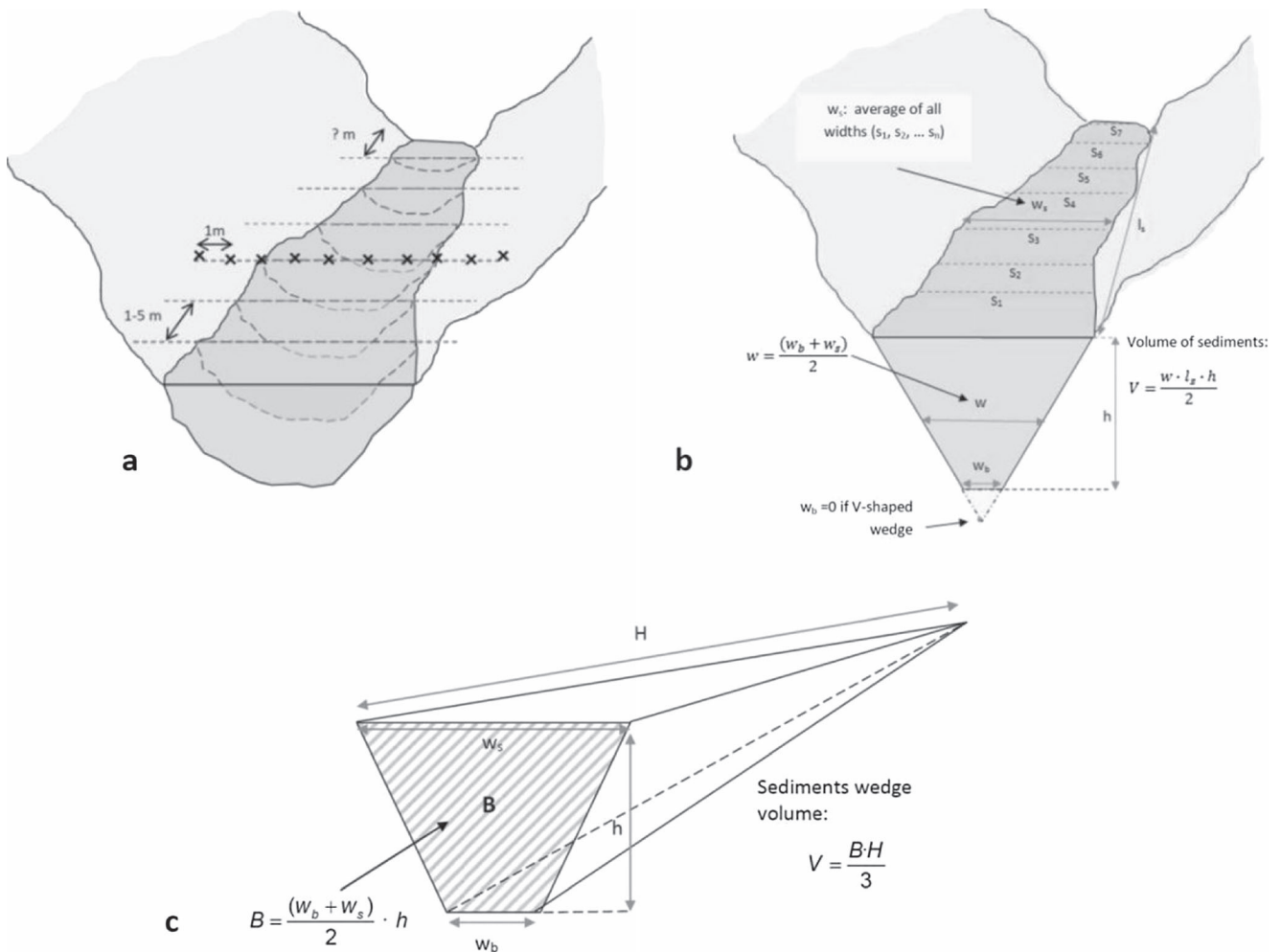


Fig. 4 Methods for measuring retained sediment wedge volume. **a** Díaz et al. (2014); **b** Castillo et al. (2007); **c** Romero et al. (2007)

River Duero. The study watershed is in Tórtoles, in the southern part of the province of Ávila, and covers an area of 400 km² (Fig. 1). The climate is dry and cold, like that of the central Spanish plateau, although somewhat rainy and moderately cool, similar to the climate around the Gredos Mountain Range. The mean annual rainfall is 571 mm and the annual mean temperature is 10.6 °C. Geological material in the area includes intensely weathered granite, giving rise to scree and boulders. The soil types are Orthents and Xerepts, with 70 % sand, a sandy clay loam texture, and a pH of ~6. Prior to the 1950s, the Tórtoles hillslopes were severely degraded in order to create pastures and to provide for livestock (Mongil et al. 2012). Given these problems, a forest-hydrological restoration project was drafted in 1964 (Azcarretazábal 1964) and implemented 1 year later. The restoration project aimed to reforest 428.41 ha of hillslopes and the watersheds of torrents and tributary streams of the River Corneja with different pine species between 1,100 and 1,500 m above sea level. Nowadays, a lush pine forest covers the entire area, with a density of ~2,800 trees ha⁻¹ (Fig. 2). In addition, the Duero River Basin Agency also planned the

construction of 313 gabion check dams to protect the Santa Teresa Reservoir, which is close to the confluence of the Rivers Corneja and Tormes, from silting. To date, only 123 check dams have been constructed. These are between 1 and 6 m high. The 15 check dams studied in this paper to calculate sediment retention (12.19 % of the total number) were carefully chosen so as to be as representative as possible. They are randomly distributed throughout the basin and along the mainstream in reforested watersheds. Table 1 and Fig. 3 show the main features of the selected check dams. The vegetation is mainly *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis* forest with *Quercus ilex* ssp. *ballota* as canopy trees, and a shrub layer of *Cistus ladanifer*, *Lavandula stoechas*, and *Cytisus scoparius*.

2.2 Methodology

The sediment volume was calculated using the methodology proposed by Díaz et al. (2014) and is based on a detailed topographical survey of the sediment wedges generated by the presence of the check dams; we refer to this as method A. It

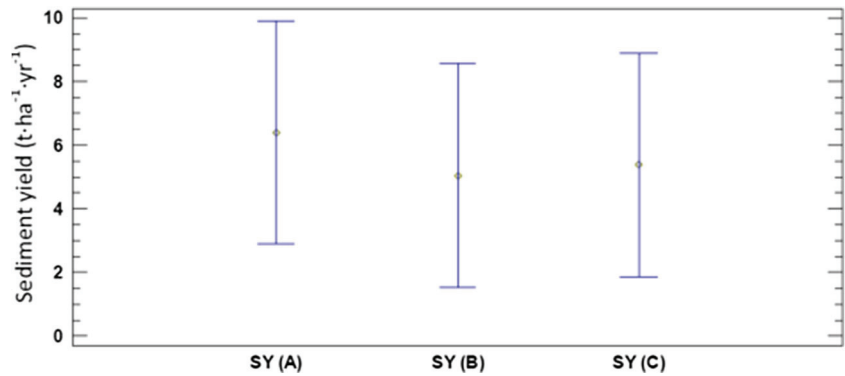
Table 2 Sediment volume (V), sediment weight (SW), retained sediment (SY), erosion rates (TSY), and trap efficiency (TE) of each check dam obtained with the specified methodologies (A, B, and C)

Check dam no.	V_A (m ³)	V_B (m ³)	V_C (m ³)	SW _A (t)	SW _B (t)	SW _C (t)	SY _A (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	SY _B (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	SY _C (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	TE _A (%)	TE _B (%)	TE _C (%)	TSY _A (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	TSY _B (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	TSY _C (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	SE _A (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	SE _B (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	SE _C (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)
1	7.95	6.53	6.00	10.32	8.47	7.79	1.42	1.16	1.07	95.42	92.42	91.81	1.48	1.26	1.16	0.07	0.10	0.10
2	24.14	13.23	14.39	30.55	16.75	18.21	8.79	4.82	5.24	99.04	97.86	98.03	8.88	4.92	5.35	0.09	0.11	0.11
3	7.58	6.17	6.78	9.67	7.88	8.65	2.35	1.91	2.10	97.82	95.48	95.87	2.40	2.00	2.19	0.05	0.09	0.09
4	5.13	3.32	2.81	6.51	4.21	3.57	1.28	0.83	0.70	91.02	86.79	84.75	1.40	0.95	0.82	0.13	0.13	0.13
5	34.08	28.48	25.95	45.64	38.14	34.76	3.09	2.58	2.35	96.59	95.40	94.98	3.20	2.70	2.48	0.11	0.12	0.12
6	11.15	6.09	6.21	16.22	8.86	9.03	3.38	1.85	1.88	97.97	94.78	94.88	3.45	1.95	1.98	0.07	0.10	0.10
7	24.82	26.86	22.36	24.29	26.30	21.89	8.35	9.04	7.52	99.33	99.13	98.96	8.40	9.11	7.60	0.06	0.08	0.08
8	7.16	4.44	5.57	9.13	5.65	7.10	2.07	1.28	1.61	96.91	93.25	94.54	2.14	1.38	1.71	0.07	0.09	0.09
9	50.49	32.33	34.11	63.02	40.35	42.57	38.47	24.63	25.99	99.83	99.62	99.64	38.53	24.72	26.08	0.07	0.09	0.09
10	1.05	0.63	1.07	1.49	0.89	1.53	0.65	0.39	0.67	82.19	73.42	82.56	0.79	0.53	0.81	0.14	0.14	0.14
11	44.64	47.77	54.86	55.85	59.76	68.62	23.72	25.38	29.14	99.60	99.57	99.62	23.81	25.49	29.25	0.09	0.11	0.11
12	5.30	3.28	5.79	6.64	4.11	7.26	0.32	0.20	0.35	90.92	79.00	86.91	0.35	0.25	0.40	0.03	0.05	0.05
13	1.96	1.41	1.66	2.38	1.72	2.02	0.42	0.30	0.36	87.12	76.69	79.45	0.48	0.40	0.45	0.06	0.09	0.09
14	21.28	19.77	20.81	26.48	24.60	25.89	1.19	1.11	1.16	96.10	93.71	94.00	1.24	1.18	1.24	0.05	0.07	0.07
15	11.68	7.51	12.75	14.57	9.37	15.91	0.45	0.29	0.49	85.93	75.65	84.06	0.53	0.39	0.59	0.07	0.09	0.09

A = method proposed by Diaz et al. (2014), B = method proposed by Castillo et al. (2007), and C = method proposed by Romero et al. (2007)

TE trap efficiency with $D=1$, according to Brown (1943), SE sediment emission (sediments emitted downstream of the check dam)

Fig. 5 Means plot (95 % Fisher LSD) for the sediment yield analysis



was carried out using a Total Station with an accuracy of ±1 cm. Several cross sections (ranging from 1 to 5 m) of the sediment trapped by each check dam were measured (Fig. 4). The weight of the sediment was determined from the volume of retained sediment and its bulk density. In order to calculate the weight, three undisturbed sediment samples were collected and the mean bulk density was calculated in the laboratory. Sediment yields and erosion rates are expressed as ton per hectare per year. They were calculated from the weight of the sediment volume (t), the drainage basin area of each check dam (ha), and the length of time since its construction (years). However, the calculated amount of retained sediment is only a fraction of the total sediment yield of the area, as every check dam has a particular trap efficiency (TE). We therefore distinguish between sediment retained or sediment yield (SY), total sediment yield or erosion rate (TSY), and sediment emission (SE). The relationship between these terms is given by Eq. (1).

$$TSY = SY + SE \quad (1)$$

A comparison was made between our results (i.e., method A) and those obtained after applying the methodologies proposed by Castillo et al. (2007) (method B) and Romero et al. (2007) (method C) (Fig. 4). To calculate the volume of sediment retained by the check dams, Castillo et al. (2007) used the mean width of the sediment wedge (w) as the width of a hypothetical trapezoid. This is defined as the average between the channel width over the ground cross section downstream of the check dam (w_b) and the mean width of several cross sections on the sediment wedge (w_s). The volume of sediment retained by the check dam is then estimated by:

$$V = \frac{w \cdot l_s \cdot h}{2} \quad (2)$$

where l_s is the length of the sediment wedge and h is the sediment height measured from the bottom to the top of the check dam.

Romero et al. (2007) used the equation of the trapezoidal based pyramid (Eq. (3)) to calculate the volume of the retained sediments (V). This is delimited by the surface of the sediment wedge over the check dam, whose length is H , and the vertical downstream surface of the check dam (b).

$$V = \frac{b \cdot H}{3} \quad (3)$$

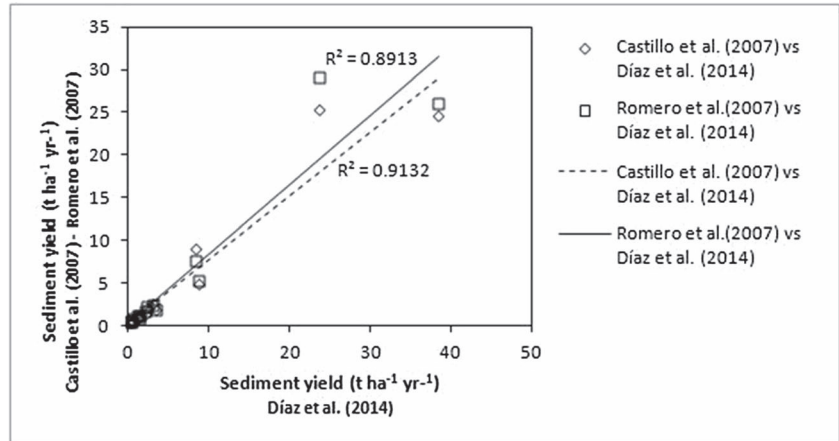
To determine whether there are significant differences between the three methods, an ANOVA analysis was performed. The LSD Fisher test, the Kruskal–Wallis test, and a regression adjustment were also performed using the STATGRAPHICS Centurion XVI statistical program.

Gabion check dams are barriers that allow the finest sediments to pass through the gaps between the stones. As not all the different particle size fractions of the sediments are retained, the check dam TE should be calculated to estimate sediment yields and erosion rates. The TE is a function of the capacity–inflow ratio, type of reservoir, and the method of operation (Brune 1953). Verstraeten and Poesen (2000) also state that TE is dependent on the characteristics of the inflowing sediment and the retention time of the water in the pond, which are in turn controlled by pond geometry and runoff characteristics. Although many methods exist to estimate the TE (e.g., Brune 1953; USACE 1989; Verstraeten and Poesen 2000, 2001), in this study we follow the one described by Brown and Jarvis (1943) as it has been used in other studies like ours (Romero et al. 2012). As the aforementioned authors state, it is

Table 3 ANOVA table for the sediment yield analysis

Source	Sum of squares	D.F.	Mean square	F value	p value
Between groups	14.7901	2	7.39505	0.08	0.9217
Intra groups	3,799.75	42	90.4702		
Total (corr.)	3,814.54	44			

Fig. 6 Dispersion plot between the method proposed by Díaz et al. (2014) and those proposed by Castillo et al. (2007) and Romero et al. (2007)



a function of the reservoir storage capacity (c) and the catchment area (W , km²) (Eq. (4)).

$$TE = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + 0.0021 \cdot D \cdot \frac{c}{W}} \right) \quad (4)$$

In the present study, c (m³) depends on the methodology used (i.e., A, B, or C). The values of D range between 0.046 and 1. Brown and Jarvis (1943) suggest that values for D are close to 1 for reservoirs in regions with lower and more variable runoff, while USACE (1989) recommends this value for regions with smaller retention times. In our case, runoff occurs with rainfall of high intensity and low frequency, while retention time is low because of permeable check dams and the high infiltration rate of the reservoir bed. The value of D is hence equal to 1 in our area. Once the TE has been chosen, SY, TSY, and SE can be calculated.

Finally, the new bed stream slope created by the sediment wedge was measured and compared with the original bed

slope. The geomorphologic changes in the streams resulting from the check dams which affect flows characteristics and runoff connectivity can thus be analyzed.

To better analyze the effects of sediment retention downstream, the quality of the river in terms of water and fish was considered under the Corneja River classification currently made by some environmental agencies in the region. This quality was compared with the situation of the river before the restoration project, around 50 years ago. We also considered the total volume of sediment that has not reached the Santa Teresa Reservoir via the River Corneja in the whole period as a result of the presence of the check dam network.

3 Results

According to the method proposed by Díaz et al. (2014) (method A), the mean volume of the sediment retained by

Fig. 7 Dispersion plot sediment yield (calculated for the three methods) versus catchment area

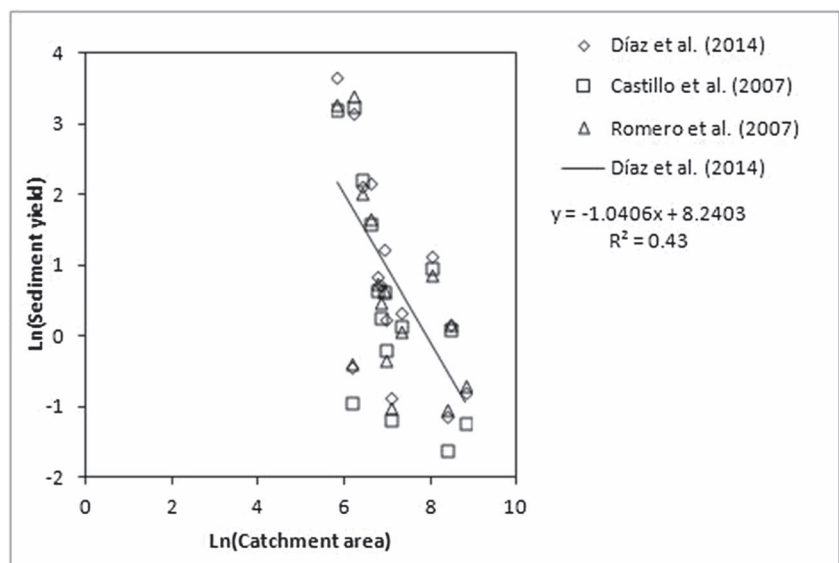
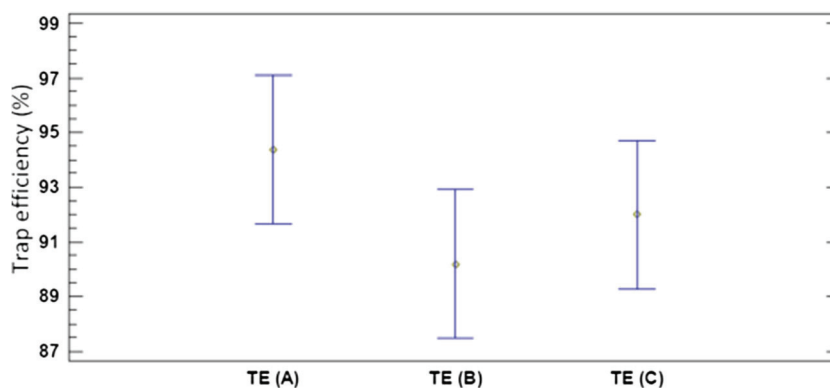


Fig. 8 Means plot (95 % Fisher LSD) for trap efficiency analysis



the check dams is 17.23 m^3 (Table 2, V_A), although the lowest value is 1.05 m^3 and the highest is 50.49 m^3 . Following the methods proposed by Castillo et al. (2007) (method B) and Romero et al. (2007) (method C), the mean volume of retained sediment is lower: 13.86 m^3 for method B and 14.74 m^3 for method C. The total volume of sediment retained by the check dams is 258.40 m^3 according to method A, 207.83 m^3 according to method B, and 221.12 m^3 according to method C. When considering the bulk density of the sediment for each check dam, (mean value of 1.27 t m^{-3}), the weight of the volume of sediment retained by a check dam is 21.52 t according to method A, 17.14 t according to method B, and 18.32 t according to method C.

The ANOVA analysis shows no significant statistical differences between the three chosen methods in terms of sediment yields ($SY_{A,B,C}$), at a confidence level of 95 % (Fig. 5, Table 3). However, at $6.40 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, SY_A is 21.09 % higher than the value obtained when employing method B ($SY_B = 5.05 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and 15.94 % higher than the value obtained using method C ($SY_C = 5.38 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Moreover, the SY is greater in 12 out of the 15 check dams when applying method A (Table 2). The SY values obtained using methods B and C for each check dam correlate well with the values obtained using method A (r for A and B is 0.9556, while r for A and C is 0.9441) (Fig. 6). However, the higher the values of the SY for each check dam, the greater the differences between method A and the other two methods. Furthermore, the catchment area (S) of each check dam and its SY correlate negatively ($r = -0.6558$) (Fig. 7).

The mean TE_A calculated according to Brown and Jarvis (1943) had a value of 94.39 % using the method proposed by Díaz et al. (2014). This result gives an estimated value of TSY_A equal to $97.09 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and of $1.15 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ for

SE_A , considering the 15 check dams, whereas for each check dam, TSY_A varies from 0.35 to $38.53 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and the SE_A has maximum and minimum values of 0.14 and $0.03 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, respectively (Table 2). When using methods B and C, the TE has a mean value of 90.18 % (TE_B) and 92.0 % (TE_C), while the mean and total TSY are 5.15 and $77.24 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (TSY_B), respectively, and 5.47 t and $82.11 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (TSY_C), respectively. These results are 21.09 and 15.94 % lower than the values obtained employing method A, while the SE for methods B and C are 0.05 and $0.14 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, respectively (Table 2). The p value from the ANOVA analysis (Fig. 8, Table 4) is 0.3069, indicating that there are no significant differences between the mean trap efficiencies (TE_A , TE_B , and TE_C), at a confidence level of 95 %.

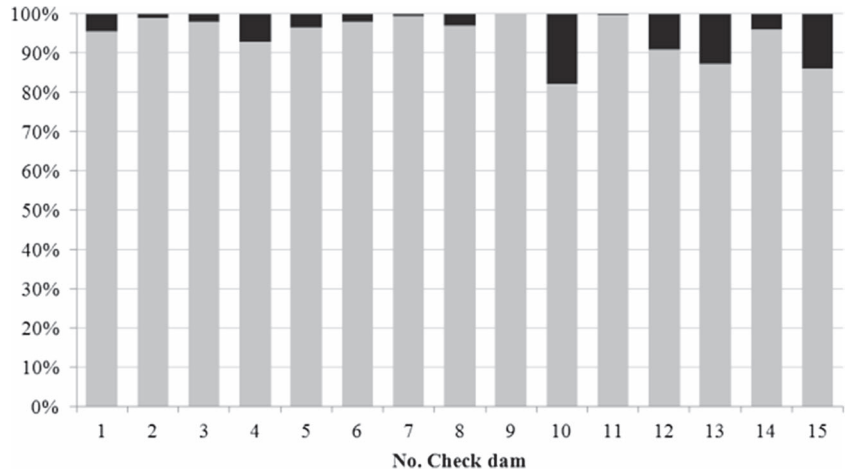
Figure 9 shows the percentage retained and non-retained sediment values for each check dam. Moreover, by focusing on the SE (Fig. 10), the ANOVA analysis also shows that there are no significant differences between the methods at a confidence level of 95 % (p value = $0.0565 \geq 0.05$). However, as the p value is very close to 0.05, the Kruskal–Wallis test was performed and shows that there are significant differences between the SE_A , SE_B , and SE_C medians (p value = $0.0400 < 0.05$). The LSD Fisher test also confirms the significant differences between these means.

It should also be noted that the construction of 123 check dams in the area has produced some hydrogeomorphologic changes as a result of the reduced bed slope of streams and gullies (see Table 1). The new bed slope in the streams and gullies has a mean value of 19.30 %, with minimum and maximum values of 7.10 > 31.74 %, with minimum and maximum values of 21.71 and 44.81 %, respectively. This means a mean reduction in bed slope of 12.44 %.

Table 4 ANOVA table for trap efficiency analysis

Source	Sum of squares	D.F.	Mean square	F value	p value
Between groups	133.175	2	66.5877	1.22	0.3069
Intra groups	2,301.44	42	54.7963		
Total (corr.)	2,434.62	44			

Fig. 9 Retained (*gray*) and non-retained (*black*) sediments by the check dams (%) according to the method proposed by Díaz et al. (2014)



According to the volume and estimated weight of the sediments retained by the studied check dams, as an initial approximation $>2,650$ t ($>2,000$ m³) of sediments may not have reached the Santa Teresa Reservoir over a period of 48 years (42 m³ yr⁻¹). This reservoir is used for water supply, irrigation, and electricity production, as well as for industrial, fishing, and recreational activities (CHD 2013). Due to this variety of uses, the water quality in the reservoir is of prime importance, and hence also the sediment retention effected by the upstream check dam network. As the mean capacity of the reservoir is 300 hm³, the weight of the sediment in this volume of water is equivalent to a suspended solids concentration of 9 mg l⁻¹, which, added to the natural concentration of the suspended solids, becomes a significant impact. The Duero River Basin Hydrographic Agency has a control station at Puente de Congosto to measure the water quality, as this is one of the main fishery stretches on the River Duero and is located immediately upstream of the Santa Teresa Reservoir (CHD 2013). The mean concentration of natural suspended solids for the period with data (1999–2010) in this stretch of river is 10.7 mg l⁻¹, with maximum and minimum values of 28.9 and 3.9 mg l⁻¹, respectively. Figure 11 and Table 5 show how the rates of natural suspended solids in this stretch of river

could be increased if the current River Corneja check dam network did not exist.

4 Discussion

Not many forest-hydrological restoration projects have been studied after long periods of ecological significance (> 50 years) (Vallauri et al. 2002). In this paper, erosion rates and sediment yields were studied after half a century, and their effects on water quality and the river ecosystem were also taken into consideration. To do so, the sediments retained by the check dam network were measured via a detailed topographical survey. Given that there are no direct data recorded by the national and/or regional agencies for water quality and the river ecosystem in Tórtoles, we took indirect data based on regional classifications for the stretches of the River Tormes downstream of Tórtoles and the River Corneja. To interpret these data, we also considered the uses and location of the Santa Teresa Reservoir, the closest reservoir downstream of the study area.

A good assessment of sediment production caused by runoff is also very important. As the tolerable soil loss in

Fig. 10 Means plot (95 % Fisher LSD) for sediment emission

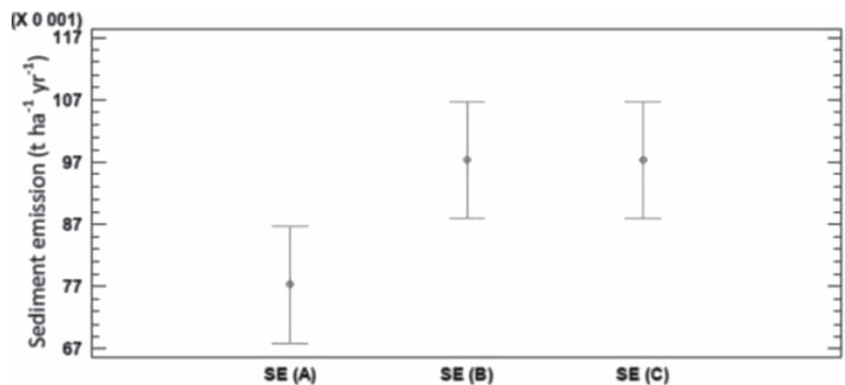
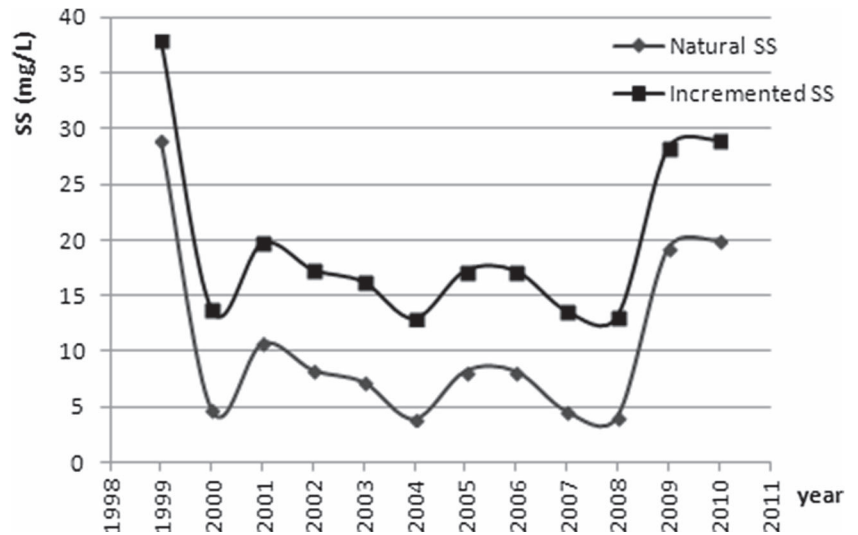


Fig. 11 Natural suspended solids (SS) in the Tormes River upstream of the Santa Teresa Reservoir during 1999–2010 and the incremented (revised) suspended solids if the check dam network in the Comeja River did not exist



Europe has recently been set at $0.3\text{--}1.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and the tolerable sediment emission to streams and rivers should be $<1 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Verheijen et al. 2009), better knowledge of erosion rates and processes is needed. Check dams are small reservoirs which provide useful information on sediment dynamics, sediment yields, and erosion rates in their catchments. In this respect, some common methods for measuring the sediment wedge of check dams are geometrically very simple (Lien 2003; May and Gresswell 2003; Castillo et al. 2007; Romero et al. 2007; Boix-Fayos et al. 2008). Although they are very simple to compute, more precision is needed to better estimate the real values of erosion and SE. We can see here how simple geometric methods underestimate the sediment retained by check dams (SY) as well as TE and TSY in the area.

The chosen method in this study (Díaz et al. 2014) provides a more realistic estimation of the sediment yield. Although, there are no significant differences between the methods proposed by Díaz et al. (2014; method A), Castillo et al. (2007; method B), and Romero et al. (2007; method C)—and methods B and C correlate well with method A—the difference between the mean values (ranging from 16 to 21 %) is $>1 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and up to $14 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ when comparing single check dams. If these differences are compared with the tolerable soil erosion in Europe (Verheijen et al. 2009), the simple

geometric methods that underestimate SY and TE could accept erosion rates (TSY) as tolerable when in fact they are not.

As regards the relationship between sediment yields and the size of the basins for each check dam, a negative correlation is obtained in this study. Sougnez et al. (2011) and Romero et al. (2007) also obtained the same negative correlation when testing in other Spanish watersheds in the Mediterranean region.

For the TE of the check dams, values between 82.19 and 99.83 % were calculated following method A, considering $D=1$. These values are higher than others calculated in similar studies. For instance, Boix-Fayos et al. (2008) estimated TE values of between 10.46 and 97.97 % after studying masonry check dams in the La Rogativa catchment (SE Spain), although they used a D value equal to 0.76. These authors obtained the lowest values for silted check dams and for those with little storage capacity in a large catchment area. Romero et al. (2012) established the TE in the Quipar River basin (SE Spain), setting D values of between 0.046 and 1. They obtained a TE between 33.9 and 98.7 %, with $D=1$. In this latter case, the lowest TE values were for concrete check dams, whereas gabion check dams gave values like those obtained in the present study and close to those obtained by other authors, such as Verstraeten and Poesen (2000).

The mean SE downstream from the check dams area is very low ($0.08 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), which implies positive effects of

Table 5 ANOVA table and multiple comparison table for sediment emission. * shows a significant difference between groups

Source	Sum of squares	D.F.	Mean square	F value	p value	Cases	Mean	Homogeneous groups	Contrast	Sig.	Difference	+/- limits groups	
Between groups	0.004	2	0.002	3.08	0.0565	SE (A)	15	0.0773333	X	SE (A)–SE (B)	*	–0.02	0.0187805
Intra groups	0.02728	42	0.000649524			SE (C)	15	0.0973333	X	SE (A)–SE (C)	*	–0.02	0.0187805
Total (corr.)	0.03128	44				SE (B)	15	0.0973333	X	SE (B)–SE (C)	0	0	0.0187805

the check dams on the fish populations in the River Corneja. Moreover, the River Corneja is designed as a “brown trout stream” by the regional river fishing agency. This means that if the present check dam network did not exist, a great amount of suspended solids would discharge into the River Corneja, and trout populations could suffer serious injury or a drastic reduction. It should be noted that the European Water Framework Directive (WFD; EU 2000) indicates that salmonid waters cannot have more than 25 mg l^{-1} of suspended solids. As our results show, the mean natural suspended solids for the period with data (1999–2010) in this stretch of river is 10.7 mg l^{-1} , with maximum and minimum values of 28.9 and 3.9 mg l^{-1} , respectively. From Fig. 11 and Table 5, it can be seen that the rate of natural suspended solids in this stretch of river could increase by a mean value of 9 mg l^{-1} if the actual check dam network in the River Corneja did not exist. With such an increase, it is possible that the waters flowing through the River Corneja channel might not have been suitable for trout during some periods, as the suspended solids concentration would be $>25 \text{ mg l}^{-1}$. Before the hillslopes and gullies were restored, there were a lot more suspended solids in the River Corneja. Regarding this problem, in 1964 Azcarretazabal wrote that “The area we are focusing on is scarce of arboreal vegetation, and there are only small shrubs and frequent erosions which provide a great amount of sediment. This sediment arrives through the River Corneja to the River Tormes, just upstream the Santa Teresa Reservoir”. These words emphasize the problems generated in the area because of the degraded land and the suspended solids in flowing waters. Nowadays, the water quality data (Fig. 11, Table 5), recorded by the control station located at Puente Congosto (CHD 2013) to monitor the trout waters downstream of the study area, show that the SSC is, in most cases, below the threshold of the WFD (EU 2000) for salmonid waters (suspended solids $\leq 25 \text{ mg l}^{-1}$).

Another effect of the check dams is the reduction in slope of the channel bed of the streams and rivers. The bed slope, which had a mean value of 31.74 %, has been modified to a mean value of 19.30 %. This supposes a mean reduction of 12.44 %. As the runoff shear stress depends on the channel bed slope (Cerdà and García-Fayos 1995), it is clear that this reduction in slope implies less sediment in the rivers. These lower bed slopes in the sediment wedges of the check dams generate a disruption in connectivity for runoff. The new slopes raise the possibility of infiltration, diminish the transport capacity of runoff, and promote cleaner waters. In some studies, bed scouring has been observed downstream of check dams (Boix-Fayos et al. 2007; Castillo et al. 2007); however, this has not been detected in any check dam in the area studied here. In Fig. 2, the great amount of pine needles accumulated on the steps of the check dam shows there is not enough runoff for bed scouring downstream. Therefore, the wash out of particles into the rivers is not expected because of the presence of the check dams.

5 Conclusions

Using a detailed topographic methodology (method A) to quantify the volume and weight of the sediment retained by check dams allows us to better determine erosion rates and sediment yields and hence better understand the effects of these structures in the restoration studied in this paper. Depending on the methods used for measuring the sediment retained by check dams, differences in results of $>1 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ involve different interpretations regarding the severity of erosion rates and the degradation of soil and water in the area. Method A affords better results than the other simple geometric methodologies (methods B and C) compared here. Our results (method A) show higher erosion rates in the area and higher check dam retention values than when applying the other, simple methods. It has also been shown that the check dams in Tórtoles are able to retain 94 % of the eroded material from gully runoff. The effects of the upstream and downstream check dams are worth noting: the amount of suspended solids reaching the streams and rivers in the area is lower than if the check dams did not exist. This enables the river's ecosystem and trout populations to be kept in good conditions, as well as avoiding silting of the Santa Teresa Reservoir. Moreover, the check dams have considerably reduced stream bed slopes, which cause a disruption in connectivity and diminish the capacity of the rivers to transport sediment. Accordingly, the sediment delivery rate into the streams and rivers in the area is also lower.

References

- Azcarretazabal D (1964) Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca río Corneja. Tramo I. Término municipal de Tórtoles. Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Obras Públicas, Spain
- Bazoffi P, Baldassarre G, Vacca S (1996) Validation of PISA2 model for automatic assessment of reservoir sedimentation. In: Albertson ML, Molinas A, Hotchkiss R (eds) Proceedings of the international conference on reservoir sedimentation. Colorado State University, Fort Collins, pp 519–528
- Boardman J (1995) Damage to property by runoff from agricultural land, South Downs, southern England 1976–93. *Geogr J* 161:177–191
- Boix-Fayos C, Barberá GG, López-Bermúdez F, Castillo VM (2007) Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology* 91:103–123
- Boix-Fayos C, de Vente J, Martínez-Mena M, Barberá GG, Castillo V (2008) The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol Process* 22:4922–4935
- Bombino G, Gurnell AM, Tamburino V, Zema DA, Zimbone SM (2008) Sediment size variation in torrents with check dams: effects on riparian vegetation. *Ecol Eng* 32:166–177
- Bombino G, Gurnell AM, Tamburino V, Zema DA, Zimbone SM (2009) Adjustments in channel form, sediment calibre and vegetation

- around check-dams in the headwater reaches of mountain torrents, Calabria, Italy. *Earth Surf Process Landforms* 34:1011–1021
- Brown CB, Jarvis CS (1943) Discussion of "Sedimentation in reservoirs". By Witzig BJ. *Proc Amer Soc Civ Eng* 69:1493–1500
- Brune GM (1953) Trap efficiency of reservoirs. *Trans Amer Geophys Union* 34:407–418
- Castillo V, Mosch W, Conesa C, González G, Navarro Cano JA, López-Bermúdez F (2007) Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena* 70:416–427
- Catella M, Paris E, Solari L (2005) Case study: efficiency of slit-check dams in the Mountain region of Versilia Basin. *J Hydraul Eng* 131: 145–152
- Cerdà A, García-Fayos P (1995) Relaciones entre las pérdidas de agua, suelo y semillas en zonas acarcavadas. Influencia de la pendiente. *Cuad Investig Geográfica* 20–21:47–63
- CHD (2013) ICA Water quality network. Water quality for waters with special protection for fish life. <http://www.chduero.es/Inicio/ElaguaenlacuencaCalidad/> Redesdecontroldecalidad/Aguassuperficiales
- Conesa C, García R (2007) Refill lithofacies and sedimentation model of check dams in the lower Cárcavo (Segura Basin). *Rev C & G* 21:77–100
- Díaz V, Mongil J, Navarro J (2014) Propuesta de una nueva metodología para determinar la efectividad de los diques en la retención de sedimentos. *Cuad Investig Geográfica* 40(1):169–190
- EU (European Union) (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000, establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327:1–72
- Huang M, Gong J, Shi Z, Zhang L (2009) River bed identification for check-dam engineering using SPOT-5 image in the HongShiMao watershed of the Loess Plateau, China. *Int J Remote Sens* 30:1853–1865
- Lien HP (2003) Design of slit dams for controlling stony debris flow. *Int J Sediment Res* 18:74–87
- Lloyd SD, Bishop P, Reinfelds I (1998) Shoreline erosion: a cautionary note in using small farm dams to determine catchment erosion rates. *Earth Surf Process Landforms* 23:905–912
- Luan Z, Changxing S, Hao Z (2010) Effects of check-dams on sediment storage-release in Chabagou Watershed. *Trans CSAE* 26:64–69
- Martin-Rosales W, Pulido-Bosch A, Gisbert J, Vallejos A (2003) Sediment yield estimation and check dams in a semiarid area (Sierra de Gádor, southern Spain). In: De Boer D, Froehlich W, Mizuyama T, Pietroniro A (eds) *Erosion prediction in ungauged basins: integrating methods and techniques*. IAHS Publ 279, IAHS Press, Wallingford, UK, pp 15–58
- May C, Gresswell R (2003) Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon coast range, USA. *Earth Surf Process Landforms* 28:409–424
- Mongil J, Navarro J, Cruz V, Díaz V (2012) Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Comeja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. Reunión del Grupo de Historia Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, Vitoria
- Romero A (2008) Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuad Investig Geográfica* 34:83–99
- Romero A, Alonso F, Martínez-Lloris M (2007) Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena* 71:172–178
- Romero A, Marín-Sanleandro P, Ortiz-Silla R (2012) Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena* 99:42–53
- Sichingabula HM (1997) Problems of sedimentation in small dams in Zambia. In: Walling DE, Probst JL (eds) *Human impact on erosion and sedimentation*. IAHS Publ 245, IAHS Press, Wallingford, UK, pp 251–259
- Sougnéz N, van Wesemael B, Vanacker V (2011) Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *Catena* 84:1–11
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers) (1989) *Engineering and design: sedimentation investigations of rivers and reservoirs*. Engineering Manual 1110-2-4000, Washington, DC
- Vallauri DR, Aronson J, Barbero M (2002) An analysis of forest restoration 120 years after reforestation on badlands in the Southwestern Alps. *Restor Ecol* 10:16–26
- Verheijen FGA, Jones RJA, Rickson RJ, Smith CJ (2009) Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Sci Rev* 94:23–38
- Verstraeten G, Poesen J (1998) Flooding of properties and sedimentation in retention ponds in central Belgium. In: Summer W, Klaghofer E, Zhang W (eds) *Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes*. IAHS Publ 249, IAHS Press, Wallingford, UK, pp 187–193
- Verstraeten G, Poesen J (2000) Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Prog Phys Geog* 24:219–251
- Verstraeten G, Poesen J (2001) Modelling the long-term sediment trap efficiency of small ponds. *Hydrol Process* 15:2797–2819
- Zeng QL, Yue ZQ, Yang ZF, Zhang XJ (2009) A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia stream, China. *Environ Geol* 58:897–911

ANEXO V:

Relación de símbolos y abreviaturas



α	Longitud del ala izquierda del dique, aguas arriba (m)
A	Diferencia entre la media de las temperaturas máximas del mes más cálido y la media de las mínimas del mes más frío ($^{\circ}\text{C}$)
A	Arena (%)
A	Superficie de las cuencas afluyentes al punto de cálculo (Km^2)
AA	Altura de aterramiento (m)
Ac	Arcilla (%)
AC	Ancho de la cuña (AC, m)
AT	Altura total del dique (m)
A_0	Superficie de las cuencas afluyentes al punto de medición (Km^2)
AU	Altura útil de cada dique (m)
A_1	Error cometido al usar la fórmula de la media de las secciones extremas en lugar de la del prismoide
A_2	Error cometido al usar la fórmula de la sección media en lugar de la del prismoide
b	Ancho medio del aterramiento previsible en la zona en que se quiere medir la pendiente j (m)
b	Ancho original del cauce (m)
b	Ancho del vertedero (m)
b_c	Ancho del cauce después de la colmatación del dique (m)
b_0	Ancho medio del cauce en la zona en que se ha medido la pendiente de compensación j_0 (m)
B	Área de la base coincidente con el dique (m^2)
B_1	Área de la sección 1, correspondiente con una base del prismoide (m^2)
B_2	Área de la sección 2, correspondiente con una base del prismoide (m^2)
B_m	Área de la base media del prismoide (m^2)
c	Longitud del ala derecha del dique, aguas arriba (m)
C	Capacidad de almacenamiento de la hidrotecnia (m^3)
C	Coefficiente de la expresión exponencial del caudal generado por la superficie de la cuenca
C	Constante que depende del material geológico del cauce
C_α	Coefficiente de resistencia al empuje hidrodinámico global
C_s	Coefficiente de Bazin modificado
C_y	Coefficiente de resistencia al empuje hidrodinámico ascensional
d	Diámetro del material del cauce (m)
D	Coefficiente de la ecuación para el cálculo de la eficiencia de trampa propuesta por Brown (1953)
Da	Densidad aparente ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
d_c	Tamaño más común (d_{50}) de las partículas del cauce (m)
DE	Disipador de energía



d_m	Profundidad a la que la velocidad del lecho influye sobre la estabilidad del material (m)
$d_{m\acute{a}x}$	Tamaño máximo de las partículas del cauce (m)
EC_v	Espesor del dique en coronación, en el vertedero (m)
EC_a	Espesor del dique en coronación, en las alas (m)
EO	Estado general de la obra
ETP	Evapotranspiración potencial (mm)
ETRMP	Evapotranspiración real máxima posible (mm)
f	Coefficiente de resistencia del lecho al comienzo del movimiento del material
$F(x)$	Frecuencia calculada por la función de Gumbel
F_{Ri}	Frecuencia observada, calculada por la fórmula de Weibull
g	Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m}\cdot\text{seg}^{-2}$)
G	Duración del periodo vegetativo (meses)
h	Distancia entre las bases del prismoide (m)
h	Altura de una pirámide, cono o prisma (m)
h	Altura de la cuña de sedimentos desde la base del dique de acuerdo con la metodología B (m)
h	Calado (m)
h	Precipitación de la estación más seca (mm)
H	Precipitación de la estación más lluviosa (mm)
H	Longitud de la cuña de sedimentos (m)
H	Altura del dique o estructura de retención (m)
H_d	Altura del dique (m)
H_x	Altura de la hilada x (m)
l	Pendiente de compensación
l_c	Pendiente de compensación
l_c	Índice de continentalidad
l_m	Índice de mediterraneidad
l_{m1}	Índice de mediterraneidad de julio
l_{m2}	Índice de mediterraneidad de julio y agosto
l_{m3}	Índice de mediterraneidad de junio, julio y agosto
l_o	Índice ombrotérmico anual
l_{od2}	Índice ombrotérmico del bimestre más seco del año
IO	Importancia actual de la obra
j	Pendiente de compensación (%)
j_o	Pendiente de compensación medida en un lugar de la cuenca en el que, ya sea por aterramiento de un dique o por estrechamiento natural, se supone que el lecho ha adquirido este carácter (%)
K	Factor de corrección para España según el tipo de roca ($K = 1$ para granito)
K_1	Coefficiente formal 1 que depende del material geológico del cauce
K_2	Coefficiente formal 2 que depende del material geológico del cauce



K_3	Coefficiente formal 3 que depende del material geológico del cauce
L	Limo (%)
L	Longitud del tramo de estudio de la pendiente de compensación (m)
LC	Longitud de la cuña de sedimentos (m)
LC	Longitud total del dique en coronación (m)
LD	Longitud del dique (m)
l_s	Longitud de la cuña de sedimentos medida sobre el terreno (m)
l_s	Longitud de la superficie de sedimentación de acuerdo con la metodología B (m)
m	Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)
M	Temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C)
Mod	Modelo de dique
Mt	Material de construcción del dique
M_v	Temperatura media de las máximas del periodo estival (°C)
n	Número de Manning
n	Número de horas de insolación anual
n	Número de orden de los individuos de la muestra
n	Coefficiente de la relación de Sternberg
N	Número total de individuos de la muestra
$N^{\circ}h$	Número de hiladas
N_{dr}	Número de diques de retención
P	Precipitación media
PA	Pendiente actual de la cárcava (%)
Pd	Precipitación máxima diaria anual
PO	Pendiente original (%)
Pp	Suma de la precipitación mensual de los meses con $T_m > 0$ °C (mm)
$Pp2$	Precipitaciones de los 2 meses consecutivos más secos del trimestre más seco (mm)
Pr	Producción de madera de Patterson (m^3 madera $\cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
P_v	Precipitación media estival (mm)
q	Flujo entrante lateral por unidad de longitud del canal ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q	Caudal en el punto de medición de la pendiente ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q_0	Caudal medido en la sección 0, conocida como aquella de la que se conocen los datos de campo ($m^3 \cdot s^{-1}$)
R	Radio hidráulico de la sección (m)
R	Reducción de la pendiente de la cárcava (%)
Rft	Reforestación en la cuenca
S	Superficie de la cuenca de aportación (m^2)
S	Pendiente original del torrente (%)
S	Superficie de la cuña de sedimentos (m^2), determinada a partir de la medición de su perímetro



S_1	Pendiente original del cauce (%)
S_2	Pendiente conseguida (%)
S_C	Pendiente de compensación (%)
SE	Tasa de emisión de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
SE_A	Tasa de emisión de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología A de estimación del volumen de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
SE_B	Tasa de emisión de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología B de estimación del volumen de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
SE_C	Tasa de emisión de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología C de estimación del volumen de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
S_i	Anchura de la cuña en la sección transversal i
SF	Superficie de aportación de los diques ficticios del modelo 2 de eficiencia de trampa (m^2)
S_n	Superficie de aportación del diques n
S_S	Pendiente estable (%)
SV	Superficie de vegetación cubierta (m^2)
SW	Masa de sedimentos (t)
SW_A	Masa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología A de estimación del volumen de sedimentos (t)
SW_B	Masa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología B de estimación del volumen de sedimentos (t)
SW_C	Masa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología C de estimación del volumen de sedimentos (t)
SY	Tasa de erosión ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
SY_A	Tasa de erosión obtenida por aplicación de la metodología A de estimación del volumen de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
SY_B	Tasa de erosión obtenida por aplicación de la metodología B de estimación del volumen de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
SY_C	Tasa de sedimentos obtenida por aplicación de la metodología C de estimación del volumen de sedimentos ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
T	Periodo de retorno (años)
TE	Eficiencia de trampa (%)
TE_{A1}	Eficiencia de trampa de acuerdo con el modelo 1, obtenida por aplicación de la metodología A para estimar la capacidad de almacenamiento del dique (%)
TE_{B1}	Eficiencia de trampa de acuerdo con el modelo 1, obtenida por aplicación de la metodología B para estimar la capacidad de almacenamiento del dique (%)
TE_{C1}	Eficiencia de trampa de acuerdo con el modelo 1, obtenida por aplicación de la metodología C para estimar la capacidad de almacenamiento del dique (%)



<i>TE_{A2}</i>	Eficiencia de trampa de acuerdo con el modelo 2, obtenida por aplicación de la metodología A para estimar la capacidad de almacenamiento del dique (%)
<i>TE_{B2}</i>	Eficiencia de trampa de acuerdo con el modelo 2, obtenida por aplicación de la metodología B para estimar la capacidad de almacenamiento del dique (%)
<i>TE_{C2}</i>	Eficiencia de trampa de acuerdo con el modelo 2, obtenida por aplicación de la metodología C para estimar la capacidad de almacenamiento del dique (%)
<i>TM</i>	Temperatura media (°C)
<i>T_{máx}</i>	Temperatura media del mes más cálido (°C)
<i>T_{mín}</i>	Temperatura mínima absoluta (°C)
<i>TMA</i>	Temperatura máxima absoluta (°C)
<i>T_{mín}</i>	Temperatura media del mes más frío (°C)
<i>T_{Mm}</i>	Temperatura media de las mínimas (°C)
<i>T_{Mm}</i>	Temperatura media de las máximas (°C)
<i>T_p</i>	Suma de las temperaturas medias mensuales > 0 °C, en décimas de grado (°C)
<i>TSY</i>	Tasa total de sedimentos (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
<i>TSY_A</i>	Tasa total de erosión obtenida por aplicación de la metodología A de estimación del volumen de sedimentos (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
<i>TSY_B</i>	Tasa total de erosión obtenida por aplicación de la metodología B de estimación del volumen de sedimentos (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
<i>TSY_C</i>	Tasa total de erosión obtenida por aplicación de la metodología C de estimación del volumen de sedimentos (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
<i>T_{p2}</i>	Temperaturas de los 2 meses consecutivos más secos del trimestre más seco (°C)
<i>u</i>	Velocidad del agua (m·s ⁻¹)
<i>V</i>	Temperatura media mensual del mes más cálido (°C)
<i>V</i>	Volumen de la cuña de sedimentos (m ³)
<i>V_A</i>	Volumen de la cuña de sedimentos calculado por aplicación de la metodología A (m ³)
<i>V_B</i>	Volumen de la cuña de sedimentos calculado por aplicación de la metodología B (m ³)
<i>V_C</i>	Volumen de la cuña de sedimentos calculado por aplicación de la metodología C (m ³)
Veg.At.	Vegetación en el aterramiento
Veg.Lad.	Vegetación en las laderas adyacentes
<i>V_{MSE}</i>	Volumen obtenido con la fórmula de la media de las secciones extremas (m ³)
<i>V_{SM}</i>	Volumen obtenido con la fórmula de la sección media (m ³)
<i>V_p</i>	Volumen obtenido aplicando la fórmula del prismoide (m ³)
Vtd	Vertedero



w	Anchura media de la cuña de sedimentación (m)
W	Superficie de la cuenca de aportación de sedimentos (km ²)
w_b	Ancho de la base del dique en la sección aguas abajo de éste (m)
w_s	Anchura media de la cuña de sedimentos de acuerdo con la metodología B (m)
W_u	Superficie de aportación del diques ficticio d_u
x	Longitud de recorrido del curso de agua desde su nacimiento hasta el punto en que se desea calcular la pendiente (km)
x_0	Longitud de recorrido del curso de agua desde su nacimiento hasta el punto en que se da el estrechamiento del cauce que ya ha adquirido la pendiente de compensación (km)
x	Perímetro mojado del cauce en un punto de medición de la pendiente (m)
x_0	Perímetro mojado del cauce medido en la sección O , conocida como aquella de la que se conocen los datos de campo (m)
X	Proporción de los sedimentos (%)
x_0	Longitud de recorrido del curso de agua desde su nacimiento hasta el punto en que se da el estrechamiento del cauce que ya ha adquirido la pendiente de compensación (Km)
α	Nivel de significación
α	Ángulo correspondiente a la pendiente original del cauce (°)
α_c	Ángulo correspondiente a la pendiente de compensación (°)
$ \Delta $	Valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia observada y la frecuencia calculada
γ	Peso específico del fluido (Kg·m ⁻³)
ρ_m	Masa específica del material (Kg·m ⁻³)
ρ	Masa específica del agua (Kg·m ⁻³)
τ	Tensión de arrastre (kg·m ⁻²)

Esta Tesis Doctoral
se terminó de redactar
el 19 de noviembre de 2014.