



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Máster
Ingeniería de Montes**

**Evolución morfológica y erosiva de
cárcavas naturales en la comarca de
Saldaña (Palencia)**

Alumno/a: Juan José Arribas García

**Tutor/a: Joaquín Navarro Hevía
Cotutor/a: Luis Ortiz Sanz**

Septiembre 2015

Agradecimientos:

En primer lugar al tutor de este estudio Joaquín Navarro, por su dedicación y por ser el guía en momentos difíciles y por su apoyo constante durante todo este tiempo.

A mis padres, Juanjo y Lilia y a mi hermano Alberto, por su paciencia y apoyo durante todos estos meses y por colaborar de la manera que han podido en la realización de este estudio.

A mi “güelito”, que le hubiera gustado leer este trabajo y que allí donde estés, todo este esfuerzo que he realizado va por ti.

A Claudia, por su apoyo, paciencia y su ayuda en los momentos más difíciles de este trabajo. Gracias.

A Ángel y Bea por ayudarme en los días de campo y sacrificar su tiempo de descanso en este trabajo. A los compañeros de despacho Sergio e Iván por tantas y tantas horas juntos y el grupo tan bueno de trabajo que hemos formado.

A los profesores de la escuela por su dedicación y su tiempo dedicado a formarme como Ingeniero de Montes.

ÍNDICE

1. Resumen	1
2. Introducción	3
2.1. Objeto del estudio	3
2.2. Justificación del estudio	3
2.3. Erosión, erosión hídrica y su problemática	3
2.4. El problema de la erosión en España	4
2.5. La erosión en cárcavas	7
3. Antecedentes	13
3.1. Métodos de medida de erosión	13
3.1.1. Medida de la erosión mediante agujas, estacas o varillas.....	13
3.1.2. Medidas mediante microperfiladores topográficos	15
3.1.3. Medición mediante parcelas	16
3.2. Estimación del avance de cárcavas	18
3.3. La variación de las tasas erosivas	20
3.4. Las restauraciones hidrológicas en el entorno de Saldaña	22
4. Objetivos	27
5. Descripción de la zona de estudio	29
5.1. Localización y situación	29
5.2. Climatología	32
5.2.1. Año tipo.....	32
5.2.2. Índices Climáticos.....	34
5.3. Edafología	35
5.3.1. Clasificación de los suelos de la zona de estudio.....	35
5.3.2. Propiedades del suelo.....	36
5.4. Geología y litología	39
5.5. Hidrología	42
5.5.1. Cuenca de estudio	42
5.5.2. Parámetros físicos de la cuenca de estudio.....	43
5.5.3. Parámetros morfológicos de la red de drenaje.....	45
5.6. Vegetación	46
5.6.1. Clasificación biogeográfica y bioclimática	47

5.6.2.	Vegetación potencial.....	47
5.6.3.	Vegetación actual.....	49
6.	Material y métodos	53
6.1.	Estudio climático	53
6.2.	Estudio edafológico	53
6.2.1.	Recogida de muestras.....	53
6.2.2.	Características físicas y químicas del suelo.....	55
6.2.2.1.	Determinación de la densidad aparente del suelo.....	55
6.3.	Caracterización hidrológica de la cuenca.....	56
6.3.1.	Delimitación de la divisoria de escorrentía directa	56
6.3.2.	Variación de la superficie y perímetro de la cuenca de estudio	57
6.3.3.	Parámetros físicos de la cuenca vertiente	57
6.3.4.	Parámetros físicos de la red de drenaje	58
6.4.	Estimación de la erosión	59
6.4.1.	Experiencias previas	59
6.4.2.	Determinación de la erosión en la zona de estudio	64
6.4.2.1.	Instalación del pluviómetro.....	65
6.4.2.2.	Instalación de la secciones de control.....	67
6.4.2.3.	Cálculo de las tasas de erosión	68
7.	Resultados	71
7.1.	Variación de la superficie de la cárcava	71
7.2.	Tasas erosivas estimadas a través de las secciones de control	74
7.2.1.	Sección de control 1	75
7.2.2.	Sección de control 2.....	78
7.2.3.	Sección de control 3.....	82
7.2.4.	Sección de control 4.....	82
7.2.5.	Sección de control 5.....	88
7.2.6.	Sección de control 6.....	91
7.2.7.	Sección de control 7.....	94
7.2.8.	Sección de control 8.....	99
7.2.9.	Sección de control 9.....	102
7.2.10.	Sección de control 10.....	107
7.2.11.	Sección de control 11	110
7.2.12.	Sección de control 12.....	114

7.2.13. Sección de control 13	117
7.3. Tasas erosivas en el periodo 1-2.....	121
7.4. Tasas erosivas en el periodo 1-3.....	122
7.5. Tasas erosivas en el periodo 2-3.....	123
8. Discusión.....	125
8.1. Variación de la superficie de la cárcava	125
8.2. Tasas erosivas estimadas a través de las secciones de control	126
9. Conclusiones.....	131
9.1. Respecto a la metodología aplicada	131
9.2. Respecto a los resultados del estudio	131
10. Bibliografía.....	133
11. Anejos	141
11.1. Climatología.....	141
11.1.1. Estaciones meteorológicas.....	141
11.1.2. Serie de precipitaciones.....	141
11.1.3. Serie de temperaturas	144
11.1.4. Clasificaciones climáticas	144
11.1.4.1. Índices pluviométricos.....	144
11.1.4.2. Índices climáticos.....	150
11.1.4.3. Índices fitoclimáticos	159
11.2. Edafología.....	161
11.2.1. Clasificación de los suelos de la zona de estudio.....	161
11.2.2. Elección del lugar y toma de muestras.....	161
11.2.3. Características físicas del suelo	163
11.2.4. Características químicas del suelo	169
11.2.5. Índices de erosionabilidad del suelo	173
11.3. Caracterización hidrológica.....	177
11.3.1. Cuenca de estudio	177
11.3.2. Parámetros físicos de la cuenca vertiente.....	178
11.3.3. Parámetros de la red de drenaje	189
11.4. Vegetación.....	195
11.4.1. Vegetación potencial.....	195
11.4.1.1. Ámbito biogeográfico.....	195

10.4.1.2. Pisos bioclimáticos	195
10.4.1.3. Serie climatófila.....	196
10.4.2. Vegetación actual	199
11.4.2. Vegetación y erosión.....	201
11.5. Medidas de erosión	203
11.5.1. Determinación de la divisoria de la cuenca de estudio	203
11.5.2. Determinación de la variación del perímetro y la superficie	204
11.5.3. Medidas de la erosión en puntos concretos	207
11.5.4. Determinación de la erosión a través de los perfiles obtenidos	207
11.5.5. Datos obtenidos	208
11.5.6. Comparación de los perfiles obtenidos	221
11.5.7. Cálculo de la erosión.....	248

1. Resumen

En las cercanías de la localidad de Saldaña (Palencia), existe una amplia zona de *badlands* o “malas tierras”, que presentan fenómenos erosivos muy graves. Antiguamente esos fenómenos erosivos provocaban coladas de barro, deslizamientos de cabeceras, caída de bloques..., pudiendo incluso provocar cortes de carretera y generando “*las turbias del Carrión*” que causaban aguas de mala calidad en las localidades aguas abajo de Saldaña e incluso problemas de abastecimiento. Ante esta problemática durante la primera mitad del s. XX, la Confederación Hidrográfica del Duero, llevó a cabo una serie de actuaciones con el objetivo de frenar y controlar los procesos erosivos, pero lamentablemente estas restauraciones no llegaron a todos los lugares de “malas tierras” como es el caso de la cárcava de este estudio, donde no se ha realizado ningún tipo de actuación, ni de medida de conservación.

El objetivo principal de este trabajo es estimar la tasa de avance de la cárcava, así como identificar y cuantificar los procesos erosivos que allí ocurren. La estimación del avance de la cárcava se realiza con ayuda de un GPS de precisión centimétrica, trazando la divisoria a través de dos mediciones, una a principio del estudio y otra al final; de esta manera al comparar las dos, podemos saber cuánto se ha incrementado la superficie de la cárcava y donde lo ha hecho. Por otro lado para cuantificar las tasas erosivas se ha creado una metodología de trabajo nueva, empleando un distanciómetro láser para la medida de erosión en laderas de la cárcava que unido a un estudio profundo de climatología, edafología, vegetación, hidrología y relieve ha permitido estimar las tasas erosivas mediante comparación de los perfiles obtenidos en las secciones de control en las diferentes mediciones que se han hecho (Diciembre, Mayo y Junio).

El avance de la cárcava en estos 9 meses que ha durado el estudio ha sido notable, incrementando su superficie en más de 200 m² y su perímetro en 0,46 m, siendo más importante esos avances en la cabecera de la cuenca y en las paredes verticales de la misma, coincidiendo con las máximas pendientes de la zona y escasa vegetación, son los lugares de más actividad de la cárcava.

Por otro lado las tasas erosivas han arrojado resultados de más de 1000 t/ha para los periodos largos de estudio, son tasas inadmisibles de pérdidas de suelo, pero razonables para la zona, puesto que todas las secciones de control han sido situadas en zonas de

elevada pendientes (superiores al 50% y cercanas al 80% de media) y los eventos de precipitación durante este periodo han sido muy concentrados y violentos.

Para el periodo de estudio corto, en el que se evalúan las tasas erosivas de las tormentas de esta primavera arrojó una tasa menor de pérdida de suelo, debido a que el periodo de estudio es más breve. Destaca en este periodo que en muchas de las secciones ha habido una ganancia de suelo, esto es debido a que las lluvias de la primavera han movido gran cantidad de suelo desde la zona alta de las laderas hasta la baja, pero no ha salido fuera de la sección de control y por lo tanto no se ha perdido.

Analizando los resultados obtenidos, la tasa de avance de la cárcava y las pérdidas de suelo son muy importantes, poniendo de manifiesto la necesidad urgente de actuación no sólo en esta cárcava si no en las de alrededor, para mitigar los procesos erosivos que allí ocurren y las posibles consecuencias de los mismos.

Finalmente el nuevo método creado para estimar la erosión con distanciómetro láser se da por aceptado, y con pequeñas mejoras se puede llevar a otras zonas donde la alta pendiente impida otro tipo de medición.

2. Introducción

2.1. Objeto del estudio

Con este trabajo, se pretende valorar y cuantificar la tasa erosiva en una zona de cárcavas en la comarca de Saldaña, así como la evaluación de un nuevo método de medida de erosión mediante el empleo de un distanciómetro láser. Los datos obtenidos serán interesantes para saber la tasa erosiva actual de la zona y poder extrapolarlos a otras zonas de similares características. Es interesante realizar el estudio en esta zona debido a que no se ha realizado ningún tipo de restauración en el lugar, y por lo tanto los procesos que allí ocurren son los naturales. Es atrayente poder comparar la tasa erosiva actual, con otras zonas cercanas donde sí se han efectuado restauraciones y con un resultado muy positivo, que han sido estudiadas en otros proyectos realizados dentro de la comarca de Saldaña (Arribas, 2013; Bartolomé, 2012; Ramos 2012, 2014...). Así como valorar la utilidad y la aplicación de este nuevo método de medida y ver sus posibles ámbitos de aplicación.

2.2. Justificación del estudio

La zona de la comarca de Saldaña, se caracteriza por el gran número de cárcavas y “*badlands*” que allí se concentran, en algunas de ellas se realizaron restauraciones hidrológico-forestales debido a que los problemas de erosión afectaban bastante a la población allí concentrada (cortes de carreteras, pérdida de la calidad del agua tanto para consumo humano como para riegos...), en otras muchas cárcavas no se realizó ninguna acción, como en la de este trabajo y es importante poder determinar qué tipo de erosión ocurre allí, su cuantificación de manera aproximada y su evolución a lo largo del tiempo, que es lo que se pretende con este estudio.

2.3. Erosión, erosión hídrica y su problemática

Según el diccionario de la Real Academia Española (RAE), se define erosión como el desgaste de la superficie terrestre producida por agentes externos, como el agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica) (RAE, 2014).

El proceso de erosión hídrica se produce de la siguiente forma: el agua de lluvia impacta sobre el suelo, provocando la degradación de los componentes superficiales y repercutiendo en algunas de las propiedades de este, como es el caso de la porosidad,

que disminuye, al reducirse la infiltración, el agua que es capaz de absorber el suelo es menor y como consecuencia, aumenta la escorrentía superficial, llevándose parte del suelo, y en el caso de las cárcavas de Saldaña, dejando esas partículas en suspensión en el río Carrión, provocando lo que era conocido como “*turbias del Carrión*”, que causaban diversos problemas como aterramiento de viviendas, de infraestructuras, de riego y comunicación, así como problemas hídricos por los sedimentos arrastrados por las lluvias (Navarro *et al.* 2013, 2014). Se sabe que desde el s. XVII, la calidad del agua, aguas abajo de Saldaña era mala, como recoge el testimonio del corregidor Marcos de Losada (Barreda, 2003), y que constituye una prueba con respecto a las zonas con graves problemas de erosión: “*es poca el agua que trae el río Carrión y la que viene está infectada (...) en invierno con avenidas y turbias (...) y resultan graves enfermedades y daños a la salud*” (Navarro *et al.* 2014).

Otra referencia del nivel de afección de la calidad hídrica, es la que señala González-Garrido (1941) en la que destaca los niveles de sólidos medidos con valores de 250 g/m³.

Lógicamente el agua no es capaz de arrastrar los grandes agregados que puede haber en la superficie del suelo, lo que arrastra son elementos finos. El proceso se desarrolla de la siguiente manera: el impacto de las gotas de lluvia sobre los grandes agregados hace que se vayan descomponiendo en partículas más finas que si pueden ser arrastradas por la escorrentía superficial.

El proceso de erosión es imposible de parar, pero sí se puede controlar, mediante una serie de acciones, como son: la corrección de torrentes (construcción de diques forestales) y las repoblaciones. En la comarca de Saldaña se llevaron a cabo proyectos de restauración hidrológico-forestal por Ayerbe (1930) y Azcarretazábal (1963) que han sido evaluados por diferentes estudios y donde se ha comprobado su efectividad para disminuir la cantidad de sedimento (Bartolomé, 2012), así como para reducir caudales (Arribas, 2013) y la capacidad de retención de los diques construidos (Ramos, 2012, 2014).

2.4. El problema de la erosión en España

La erosión constituye el problema ambiental más importante de nuestro país, y más teniendo en cuenta que España ha sido calificado por Naciones Unidas como el único

país europeo de muy alto riesgo de desertificación por erosión de sus suelos (Almorox *et al.*, 2010).

Para cuantificar las pérdidas de suelo por erosión el ICONA en 1992 definió los niveles erosivos para España, que podemos observar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de las pérdidas de suelo en España (Feliu y Gueorguéva, 2003).

Nivel de erosión	Pérdidas de suelo (t/ha y año)
Ninguna o ligera	< 10
Baja	10 -25
Moderada	25 – 50
Acusada	50 – 100
Alta	100 – 200
Muy alta	>200

La pérdida media de suelo en España, varía en función de las regiones, pero se sitúa en 23,4 t/ha y año (Ibáñez *et al.*, 2003 en Navarro, 2010). Por lo tanto acudiendo a la Tabla 2.1, se ve como las pérdidas de suelo en España son bajas a moderadas.

El Resumen Nacional de los Mapas Erosivos publicados entre 1987 y 2002 por ICONA y luego por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza, muestra que en el 46% del territorio nacional la intensidad del proceso de erosión es muy superior a los límites tolerables de 12 t/ha y año y que un 12% del territorio nacional está sometido a una erosión muy severa, con pérdidas superiores a 50 t/ha y año. Estas zonas sometidas a erosión severa, se sitúan en su mayoría dentro de las cuencas hidrográficas mediterráneas (PAND, 2008)

En la Figura 2.1, se muestra el Mapa de Estados Erosivos para España, donde podemos observar que en la provincia de Palencia, la erosión ronda las 12 t/ha y año, y que en la localidad del estudio, Saldaña aumenta hasta las 25 t/ha y año.

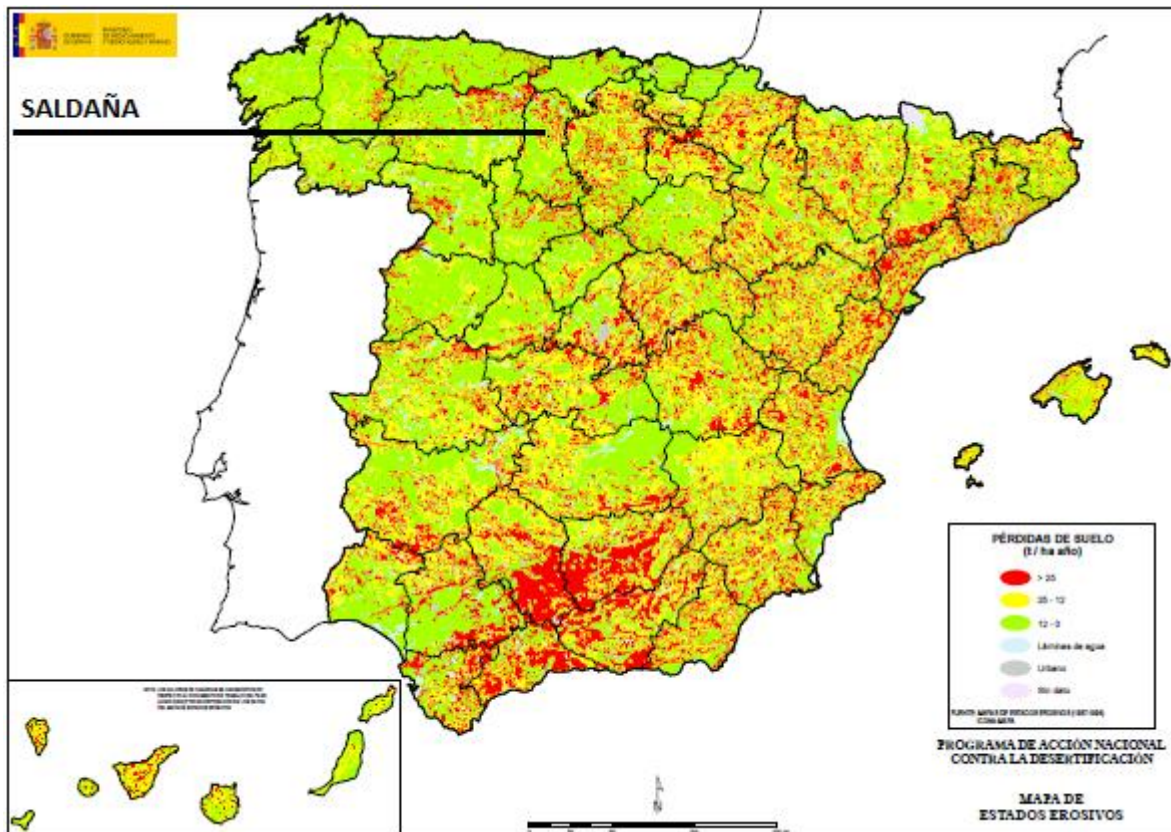


Figura 2.1. Mapa de Estados Erosivos de España (Ministerio de Medio Ambiente, 2012).

Observando el mapa se puede apreciar que la erosión es bastante baja en toda la Cornisa Cantábrica, aumentando a medida que se avanza hacia el sur y el este de la Península. Según el Ministerio de Medio Ambiente (MAGRAMA, 2012), en Castilla y León el porcentaje de suelo respecto al total con erosión moderada alcanza el 88,79%, mientras que con erosión media el 8,19% y con procesos de erosión altos apenas llega al 3,02%. Entendiendo como pérdidas moderadas aquellas que están entre 0 y 10 t/ha y año, medio de 10 a 25 t/ha y año y alta aquella que supera las 25 t/ha y año. Por lo que podemos concluir que según el MAGRAMA la mayor parte de Castilla y León sufre procesos erosivos moderados.

Para la provincia de Palencia, en donde está ubicado el presente estudio, el MAGRAMA en su Inventario Nacional de Suelos del año 2013 arroja los siguientes datos para esta provincia que se pueden ver en la Tabla 2.2 que se muestra a continuación.

Tabla 2.2. Superficie y pérdidas de suelo según niveles erosivos para la provincia de Palencia (Inventario Nacional de Suelos). Fuente: MAGRAMA, 2013.

Provincia	Nivel erosivo (t . ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Superficie geográfica		Pérdidas de suelo		Pérdidas medias (t . ha ⁻¹ .año ⁻¹)
		Hectáreas	Porcentaje	t . año ⁻¹	Porcentaje	
PALENCIA	0 a 5	604.023,7	75,0	902.707,1	20,7	1,5
	5 a 10	83.075,2	10,3	587.224,7	13,5	7,1
	10 a 25	67.662,5	8,4	1.047.894,4	24,1	15,5
	25 a 50	24.552,8	3,1	850.061,2	19,5	34,6
	50 a 100	9.938,5	1,2	666.523,5	15,3	67,1
	100 a 200	1.992,7	0,3	255.072,2	5,9	128,0
	> 200	189,1	0,0	49.344,5	1,1	261,0
	Superficie Erosionable	791.434,5	98,3	4.358.827,5	100,0	5,5
	Láminas de agua superficiales y humedales	3.198,3	0,4			
	Superficies artificiales	10.618,4	1,3			
	Total	805.251,2	100,0			

Analizando la tabla anterior, vemos como el 75% de la provincia tiene pérdidas de suelo bajas de 0 a 5 t/ha y año, mientras que altas o muy altas, entendiendo por tales aquellas que superan las 25 t/ha y año corresponden a un 4,6% de la superficie de la provincia.

2.5. La erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas es un proceso 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. Las incisiones que constituyen las cárcavas se ven potenciadas por avenidas violentas y discontinuas típicas del clima mediterráneo, lluvias intensas y continuas sobre terrenos desnudos (Díaz Gutiérrez *et al.*, 2012).

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*.

Las *badlands* aunque solo ocupan una extensión del 5 % en el sur de Europa suelen ser las responsables del 50 % al 80 % de la emisión de sedimentos dentro de sus cuencas y en España se han detectado tasas de erosión que oscilan entre varias toneladas por hectárea hasta casi un centenar (Díaz Gutiérrez *et al.*, 2012)

El impacto ambiental de las zonas de cárcavas, no se limita solo al área de las “*badlands*” sino que también afecta a las zonas que se encuentren aguas abajo, donde se depositarán los materiales arrastrados. Valentín *et al.* (2005) realizaron una recopilación de datos sobre el aporte de sedimentos por parte de las zonas de cárcavas dentro de su cuenca vertiente, y llegan a la conclusión de que estas zonas aportan entre el 60 y el

90% de los sedimentos y como consecuencia de ello los ríos, embalses e infraestructuras de riego se van aterrando y con ellos disminuyendo su capacidad de transporte o almacenamiento, por lo que aumenta el riesgo de inundaciones.

Si entramos en el nivel hidrológico, las zonas de cárcavas suponen una expansión en la red de drenaje, el agua se pierde rápidamente, por regueros y surcos e impide que se distribuya uniformemente por toda la superficie (Valentín *et al.*, 2005). El aumento de la red de drenaje incrementa la torrencialidad de la zona, y como consecuencia se producen más fácilmente inundaciones relámpago ante episodios de lluvias fuertes y tormentas, además de la emisión de sedimentos.

La erosión en cárcavas supone una degradación del suelo debido a la pérdida de material. Esto puede tener implicaciones negativas en la agricultura (disminución de la productividad natural del terreno por el arrastre del suelo fértil, o por la deposición de suelos infértiles provenientes de las zonas erosionadas y como consecuencia la reducción del área útil de cultivo), en el abastecimiento de agua (aterramiento de embalses), pérdida de calidad ambiental...

Como se puede ver este tipo de degradación es capaz de generar grandes problemas y por lo tanto es importante actuar, tanto en la prevención, como en la solución del problema y valorar la efectividad de las actuaciones realizadas.

Este estudio está centrado, en una cárcava representativa que se encuentran próxima a la localidad de Saldaña, concretamente en la pedanía de Villantodrigo, perteneciente al Ayuntamiento de Quintanilla de Onsoña a escasos 8 km del municipio de Saldaña.

Dentro de las cárcavas nos podemos encontrar diferentes tipos de erosión, que se describen brevemente a continuación:

- Erosión laminar

Se produce por la disgregación de las partículas del suelo, tanto por salpicadura como por escurrimiento. El suelo se va perdiendo en delgadas capas incorporándose gran cantidad de sedimentos al río. En la Figura 2.2. se puede observar este tipo de erosión dentro de la cárcava de estudio.



Figura 2.2. Erosión por salpicadura en la cárcava de estudio.

- Erosión en regueros y surcos

Como su mismo nombre dice, son pequeños regueros, que se forman por la concentración de agua en diversos puntos y que van socavando el terreno hasta formar los regueros. En la Figura 2.3. se puede ver uno de los muchos regueros que hay en la cuenca de estudio.



Figura 2.3. Erosión por regueros dentro de la cárcava de estudio.

- Cárcavas y barrancos

En caso de no intervenir sobre los regueros, estos se harán más grandes y de mayor profundidad hasta alcanzar varios metros, pudiendo formar cárcavas y barrancos. El desarrollo de zonas con marcados procesos de erosión en cárcavas, genera la denominadas “malas tierras” o *badlands*. Estas áreas se desarrollan sobre todo tipo de texturas, aunque suelen predominar sobre las arcillosas, textura que coincide con la de la zona de estudio. El origen de estas *badlands* puede tener varias causas entre las que destacan: desniveles generados por la tectónica, cambios en la red de drenaje, abusos del terreno, ausencia de vegetación...

En la Figura 2.4. se muestra la erosión en cárcavas dentro de la zona de estudio.



Figura 2.4. Erosión en cárcavas en la zona de estudio.

- Deslizamientos

Constituyen movimientos en masas de tierra o de roca en una distancia corta, en pendiente y formándose en la superficie una especie de escalones o concavidades respectivamente. Se producen como consecuencia de la saturación del suelo a cierta profundidad y la generación de un plano de deslizamiento.

Dentro de la cárcava de estudio, los deslizamientos suelen producirse en la zona de cabecera. En la Figura 2.5 se muestra este tipo de erosión, viendo como se deslizan piedras desde la parte alta hacia la más baja.



Figura 2.5. Erosión por deslizamientos en la zona de estudio.

- Tubificación o *piping*

Este tipo de erosión surge por el desarrollo de una red de drenaje subsuperficial que termina por colapsarse y formar grietas o “tuberías” en el suelo desde la superficie hasta el interior, es muy frecuente en zonas de *badlands*, como es la zona en la que está situado este estudio. Las lluvias torrenciales y los periodos de sequedad, sobre todo en zonas con texturas arcillosas favorecen la aparición de este tipo de grietas en los suelos. También tiene influencia el uso del suelo, suelos abandonados, degradados, deforestados o aterrizados son propicios para que se de este tipo de erosión.

La no actuación sobre este tipo de erosión conlleva que las grietas avancen, pudiendo ocasionar derrumbamientos o deslizamientos.

En la Figura 2.6 se puede ver, una de las muchas tubificaciones que se encuentran en la zona de estudio, en este caso se muestra una de un tamaño considerable.



Figura 2.6. Tubificaciones en la cárcava de estudio.

3. Antecedentes

3.1. Métodos de medida de erosión

Como se ha señalado en el apartado anterior, la erosión constituye uno de los problemas medioambientales más importantes no solo a nivel nacional, sino también a escala internacional. Desde finales del siglo XIX se han empleado diferentes y múltiples métodos para evaluar la erosión hídrica. Los métodos se han ido creando en función de las formas de erosión a medir, el esfuerzo de coste y el tiempo del que se disponía. A continuación pasamos a comentar alguno de los más utilizados.

3.1.1. Medida de la erosión mediante agujas, estacas o varillas

Es uno de los métodos que se han utilizado más frecuentemente debido a su sencillez, economía y su escaso mantenimiento, alguno de los inconvenientes que tiene este método son las interferencias que pueden causar los habitantes cercanos a los puntos de medida o la sustracción de los clavos o agujas de erosión como pasó en este estudio.

Por resumir, este método consiste en incrustar en el terreno clavos, agujas o varillas de manera que queden enrasados en el suelo o realizar una marca en ellos en el nivel donde se encuentra el terreno, tras un lapso de tiempo se vuelve al lugar y se realiza la medición desde la marca, al nivel donde se encuentra el suelo y de esa forma se obtiene el rebajamiento del terreno, en el lapso de tiempo que hayan pasado entre ambas mediciones.

En la Figura 3.1. se pueden ver los clavos y chapas utilizados dentro de la zona de estudio de este trabajo y que posteriormente fueron sustraídas.



Figura 3.1. Izda: Clavos y chapas utilizados. Dcha: Clavos y chapas enrasados a nivel del suelo.

La misma forma en la que se dispuso los clavos en este estudio coincide con la utilizada en Chile, en la región de Coquimbo por Pizarro *et al.* (2010), donde instalaron parcelas abiertas de clavos, para permitir el flujo de agua y sólidos desde la parte alta de la ladera hasta la parcela de estudio, de forma que tras episodios de fuertes lluvias regresaban a la parcela para realizar las mediciones, esas medidas se realizan con una precisión milimétrica. La Figura 3.2. extraída de Pizarro *et al.* (2010), se puede ver como se realiza la medición de los clavos de erosión en ese estudio.

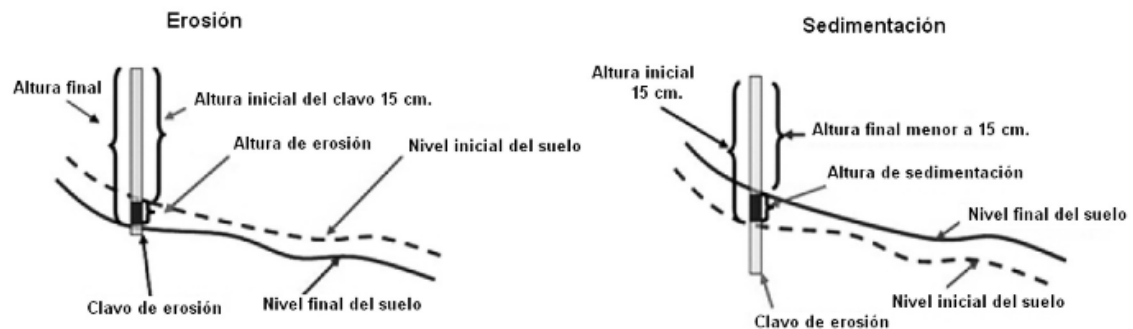


Figura 3.2. Formas de medición de la altura de erosión y sedimentación de los clavos (Pizarro *et al.*, 2010).

Como se observa en la figura anterior, puede darse que la cota de suelo este por encima del nivel del terreno cuando se instaló el clavo, en ese caso estamos hablando de que no ha habido pérdida de suelo, si no una ganancia de terreno, debida a la sedimentación de suelo procedente de las partes altas de la ladera.

Posteriormente con los datos obtenidos mediante las mediciones, así como la densidad aparente del suelo, calculaba los valores de erosión neta, que para esta zona varían dependiendo de los años, pero que están aproximadamente en las 5 t/ha.

Esta misma técnica de medición por clavos de erosión fue utilizada por Navarro *et al.* (2002), para estimar la erosión en desmontes ferroviarios cercanos a la ciudad de Palencia, donde los clavos se dispusieron en 4 parcelas (dos de solana y dos de umbría) y las mediciones se realizaron con un medidor diseñado expresamente para ese método. En este caso los resultados se corresponden con un periodo de 9 meses, y se obtienen tasas de erosión muy elevadas, con un valor medio de 594 t/ha y año, llegando a un máximo de 1092 t/ha y año en parcelas umbrías.

Clavos de erosión también han sido utilizados en la Región de Murcia, para estimar volúmenes de materiales erosionados en la cabecera de las cárcavas (Francis, 1985), estimar la erosión laminar en pantanos de residuos mineros en Sierra de Cartagena-La

Unión (Moreno Brotons, 2007) y evaluar los sedimentos retenidos en los diques de corrección hidrológica tras cada episodio de lluvia (Romero *et al.*, 2007).

De esta forma se puede ver que este método es muy utilizado, no solo en España, donde hay estudios en diversas partes de su geografía (Murcia, Palencia...) si no en otros lugares del mundo como Chile.

3.1.2. Medidas mediante microperfiladores topográficos

Este método consiste en estudiar las variaciones temporales microtopográficas en dos o tres dimensiones, para ello es preciso situar unos puntos fijos de referencia sobre los que se apoya el perfilador en las sucesivas medidas. El perfilador consta de unos indicadores (por lo general suelen ser varillas) que pueden moverse vertical u horizontalmente en función del objetivo propuesto y que reproducen las variaciones de topografía. De este modo y tratando los datos de forma adecuada es posible obtener magnitudes de rebajamiento superficial o de deposición (Sancho *et al.*, 1991). Este método como base ha sido utilizado en numerosos trabajos para cuantificar erosión. En la Figura 3.3. se puede observar un perfilador como el descrito anteriormente.

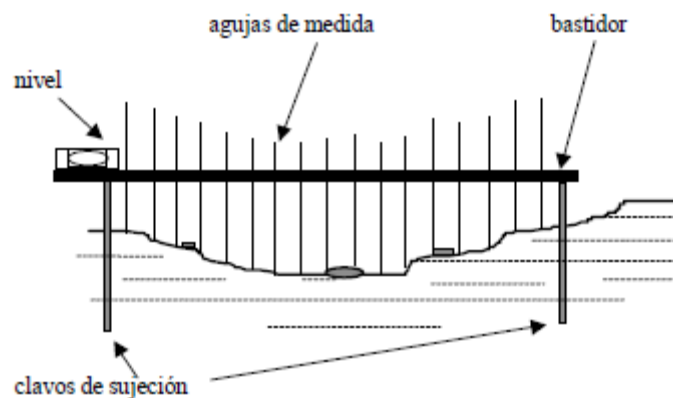


Figura 3.3. Perfilador bidimensional (Navarro, 2009).

Entre las ventajas de este método destaca su sencillez, economía y facilidad de elaboración; como desventajas destacan la limitación de pendiente, así como dificultad en su transporte y en suelos con existencia de vegetación las medidas pueden verse dificultadas (Navarro, 2009).

Este método fue utilizado en un estudio de cárcavas efímeras en Navarra, donde se midió la forma de las secciones transversales de todas las cárcavas mediante un perfilador de 1 metro de anchura, siguiendo el método propuesto por Sancho *et al.* (1991) para surcos naturales (Casalí *et al.*, 1999).

En el estudio realizado por Sirvent *et al.* (1997) en Lanaja (Huesca) en la región llamada Monegros, también se utilizó la técnica propuesta por Sancho *et al.* (1991), el perfilador tenía unas dimensiones de 110 cm de ancho y 90 cm de alto, las varillas del instrumento tenían una longitud de 30, 40 o 50 cm y una sección de 4 o 6 mm y estaban hechas en acero pero recubiertas con una capa de zinc con el objetivo de evitar la erosión. Las mediciones se realizaron cada 6 meses. De esta forma se determinó que la tasa erosiva mediante este método es de 131,1 t/ha y año. Las mayores tasas erosivas se detectaron en la parte alta (cabecera de la cárcava).

3.1.3. Medición mediante parcelas

Para la realización de este método, es necesario crear dentro de la zona de estudio, parcelas, de tamaño variable y dentro de ellas situar depósitos o colectores, para recoger el material arrastrado dentro de la parcela. Existen varios tipos de colectores y muy frecuentemente estos colectores son creados por los propios autores de los estudios para adaptarlos a la zona. Uno de los tipos más utilizados son los canales de tipo Gerlach (1967), más o menos modificados. Este modelo se basa en un canalón de lluvia de 50 cm de longitud de metal o plástico, con una tapa que lo cubre de la lluvia, en uno de sus bordes lleva un pequeño labio para contactarlo con el suelo y en el otro extremo del canalón se encuentra el orificio de salida del agua con sedimento que se conecta con un depósito de dimensiones apropiadas (Navarro, 2009). Las dimensiones de ese depósito dependen de la climatología de la zona de estudio y de la duración del trabajo. En la Figura 3.4. se muestra como son los canales Gerlach.

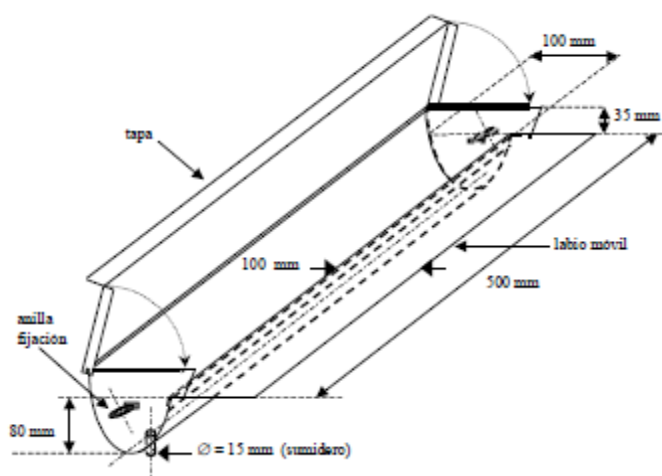


Figura 3.4. Colector Gerlach (Navarro, 2009).

En otros casos las parcelas simplemente se cierran, mediante pequeños bordillos o caballones y se dirige la escorrentía hacia un punto de salida en donde se sitúa un depósito que recogerá el agua con los sedimentos. En la Figura 3.5. se muestra este tipo de parcelas.



Figura 3.5. Parcela experimental cerrada construida por el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS) (López Bermúdez *et al.*, 1993).

Como se señala anteriormente, este método ha sido frecuentemente utilizado, uno de los estudios donde se ha empleado fue el realizado por De Alba *et al.* (2002) en la provincia de Toledo, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Tajo. Se realizaron parcelas con una superficie de 250 m², 25 metros a favor de la pendiente y 10 m de anchura, las parcelas eran de erosión cerrada con un límite artificial desmontable siguiendo la metodología de Hudson (1993). En la parte inferior de las parcelas se presentan dispositivos de conducción y recolección del agua de escorrentía con los sedimentos hacia depósitos de almacenaje.

Otro trabajo donde se han utilizado parcelas para estudiar la erosión fue el realizado por López Bermúdez *et al.* (1999), en la Región de Murcia, concretamente en la Cuenca del Río Mula. En este estudio emplearon para el control de la escorrentía y las pérdidas de suelo un grupo de 6 parcelas con dimensiones de 2x8 m, con un depósito de 200 litros. Posteriormente del agua con sedimento recogido, se toma una muestra que es analizada

en laboratorio, para conseguir la evaporación del agua y quedarse con los sedimentos que son pesados. Los resultados de esta investigación arrojan tasas de producción de sedimentos muy variables de unos años a otros, llegando a la conclusión que cuando se abandona un uso de suelo aumenta la erosión de manera considerable de 0,37 t/ha y año cuando estaba cultivado a 6,8 t/ha y año cuando se deja de cultivar.

También se emplearon parcelas, en el trabajo realizado por Rodríguez *et al.* (2002), en las Islas Canarias, en este caso se montaron tres parcelas de estudio de 200 m² (25x8 m), una de ellas con suelo desnudo, otra con *Pinus radiata* procedente de repoblación y densidad 60% y la última colonizado por vegetación espontánea. Los datos recogidos se corresponden con un periodo de 9 años (1993-2001) tomando muestras de sedimento y escorrentía. En cuanto a los resultados que arroja este trabajo, nos confirma lo de los anteriormente citados, que las tasas de erosión son muy variables tanto entre años, como mensualmente, pero durante la duración de este trabajo se han llegado a tasas de 9,9 t/ha y año en la parcela desnuda, en el resto de parcelas las tasas fueron prácticamente nulas. Hay multitud de estudios distribuidos por toda la geografía del territorio español, por poner otro ejemplo, el trabajo realizado por Durán Zuazo *et al.* (2002) en la finca experimental “El Zahorí”, en la región de Almuñécar (Granada), se realizaron 3 parcelas cerradas con una superficie de 16 m² (4x4 m), cada parcela consta de un cierre de chapa galvanizada, cajón colector y un tanque bidón que recoge las aguas de escorrentía; dos de esas parcelas tienen cubierta vegetal de plantas aromáticas y la restante posee suelo desnudo. Los datos se recogieron durante dos años, y los resultados obtenidos indican que en suelos con cubierta vegetal las tasas de producción de escorrentía son menores que en suelos desnudos, así como la infiltración también es mayor que en suelos desnudos.

3.2. Estimación del avance de cárcavas

Otra forma de poder conocer lo activa que está una cárcava, es determinar la tasa de avance o retroceso de la misma, mediante diferentes métodos, como pueden ser: por comparación de fotografías aéreas, por testimonios históricos de habitantes cercanos al lugar de estudio, mediante mediciones de la divisoria de la cuenca de estudio con GPS y comparación entre diferentes mediciones con un lapso de tiempo (como es el caso del presente estudio). A continuación se pasa a citar algunos de los estudios que se han realizado con relación a este tema.

Vicente *et al.* (2009), analizan la evolución de cárcavas en Guadarrama (Segovia), para determinar esa evolución se basan en técnicas de trabajo históricas, cartográficas y fotográficas. Además de hablar con los lugareños, analizan fotografías aéreas desde el año 1946 hasta el año 2004; con todo ello extraen resultados, destacando tasas de retroceso media de 0,29 m/año llegando a máximos de 0,78 m/año.

En el estudio realizado por Gómez Gutiérrez *et al.* (2009) en la cuenca de Parapuños al NE de la ciudad de Cáceres, se trata de un área representativa de la zona. La cárcava de estudio se desarrolla sobre fondo de valle y con varias cabeceras. A la hora de estudiar la evolución del acarcavamiento han empleado dos métodos, el primero de ellos comprende los años de 2001 a 2006 y se basa en la monitorización de 28 perfiles transversales a lo largo del cauce, el levantamiento de dichos perfiles se realiza mediante estación total láser y con una frecuencia aproximada de 6 meses. El volumen del material erosionado o depositado a la sección de cauce delimitado por dos perfiles consecutivos para el período transcurrido entre dos levantamientos, se estima como la media del cambio registrado en ambas secciones durante dicho período por la distancia que las separa. Mientras que para el periodo 1945 a 2006, el análisis se basó en la realización de cartografía a partir de ortofotografías aéreas. Sobre los fotogramas aéreos originales se llevo a cabo un proceso de ortorrectificación. Los resultados extraídos de este trabajo muestran una tasa media de avance de 5,18 m²/año y un incremento de la superficie de la cárcava de 314 m². Si bien es cierto que en los últimos años ha habido un incremento en el avance de la cárcava debido al aumento de la carga ganadera, que hace que se produzca compactación del terreno reduciendo la infiltración y aumentando la producción de escorrentía y aumentando la tasa de avance de la cárcava.

En el norte de la provincia de Barcelona, en las comarcas del Alt Penedès y de l'Anoia; Martínez-Casasnovas y Concepción Ramos (2009) también estudian el retroceso de cárcavas, determinan el área afectada por barrancos mediante fotografías aéreas verticales con solape estereoscópico del año 1993. El resultado fue georreferenciado en un ortomapa 1:50000 y digitalizado. Para el cálculo de la tasa de retroceso de las paredes de los barrancos se llevó la delineación del perímetro de los barrancos. El área erosionada entre 1975 y 1995 representa una tasa de erosión de 230 m²/año o una tasa de retroceso lineal de 0,08 m/año. Como es normal la tasa de retroceso no es uniforme a lo largo del perímetro, siendo esta mayor en las paredes laterales que el retroceso de cabecera de la cárcava.

En una zona cercana a la de este trabajo, a apenas 8 km, en la localidad de Saldaña, un estudio realizado por Ramos (2013) en una de las muchas cárcavas que allí se sitúan efectuó un análisis de la variación morfológica del perímetro y superficie de la cárcava mediante la interpretación de altimetría, fotogramas aéreos y ortofotografías de la zona, arrojando como resultado un tasa de avance media para el periodo 1930-2011 de 19,75 m²/año y una variación de 2,5 cm/año, no obstante esta cárcava no muestra resultados muy altos debido a que fue restaurada en dos ocasiones por la Confederación Hidrográfica del Duero. En los primeros años después de la restauración donde sus efectos no eran tan notables como en la actualidad la tasa de avance era de 31,9 m²/año.

3.3. La variación de las tasas erosivas

Como se ha podido comprobar en numerosos trabajos y en este en concreto, la variabilidad de las tasas erosivas es un hecho, ya no solo a nivel de provincia o de país si no dentro de una misma zona de estudio. A continuación pasamos se citan algunos trabajos situados en diferentes zonas para demostrar este hecho.

Esta variabilidad puede estar condicionada por los factores que influyen en la erosión hídrica que principalmente son los siguientes: el clima, puesto que condiciona la intensidad, cantidad y duración de las precipitaciones (erosividad de la lluvia), la litología, que condiciona la resistencia del material a ser erosionado, la geomorfología del terreno, puesto que en función de la pendiente del terreno la erosión será mayor o menor (Desir y Marín, 2009). Como vemos estos factores varían de un lugar a otro y como consecuencia las tasas de erosión también varían con ellos.

Según ICONA (1980-90) la erosión hídrica media en España es de 27 t/ha y año, un valor mucho más alto que la media considerada como aceptable

Desir y Marín (2009) en el estudio realizado en Bárdenas Reales (Navarra) extraen como resultados tasas de 32 t/ha y año, en materiales terciarios y de 77,21 t/ha y año, en materiales holocenos menos litificados.

En la Región de Murcia, Romero Díaz *et al.* (2012), obtienen tasas de erosión mediante diferentes métodos (clavos de erosión, perfiladores microtopográficos, parcelas abiertas, parcelas cerradas, simuladores de lluvia...), y aunque los resultados dependen de los métodos utilizados, el trabajo concluye que en general las tasas erosivas en la Región de Murcia en zonas de *badlands* con usos y manejos poco adecuados los valores pueden elevarse a mas de 50 t/ha y año, pudiendo llegar incluso a superar las 100 t/ha y año. El

estudio también indica que las mayores tasas se han obtenido en terrenos con elevadas pendientes, suelos desprotegidos por cubierta vegetal.

Otro estudio que confirma la variabilidad de las tasas erosivas es el realizado por Rodríguez *et al.* (2002), ya que señalan que la producción de sedimentos y por lo tanto de tasas de erosión son muy variables tanto anualmente como mensualmente, ocasionado por la variabilidad de los episodios lluviosos y del estado de la superficie del suelo. En este caso se utilizaron parcelas y durante un periodo de tiempo de 9 años concluyendo para terrenos desnudos una tasa de 9,9 t/ha y año.

Durán *et al.* (2014) en un trabajo realizado en Lanjarón (Granada), donde estudian la erosión para diferentes usos del suelo mediante el empleo de parcelas cerradas. Los resultados obtenidos dan tasas erosivas muy pequeñas, prácticamente nulas para parcelas con arbolado (*Pinus halepensis* y *Pinus sylvestris*), mientras que para parcelas con suelo abandonado la tasa erosiva supera las 0,5 t/ha y año, confirmando el papel tan importante que tiene la cubierta vegetal en reducir la erosión.

López Vicente y Navas (2009), estudian las tasas erosivas en la cuenca de drenaje de la Cárcava “La Coloma” de 12,2 ha situada en la parte central de las Sierras Exteriores pirenaicas. Propiamente la cárcava “La Coloma” tiene una extensión de 0,8 ha con una pendiente media de 32,8%, a lo largo del cauce no se observa prácticamente vegetación. En este caso se sigue el modelo RMMF (*Revised Morgan, Morgan and Finney model*; Morgan, 2001) para calcular las pérdidas de suelo, ya que predice la pérdida promedio anual de suelo a partir de la capacidad de transporte de la escorrentía y de las tasas de desagregación del suelo por salpicadura y por escurrimiento. Finalmente los resultados para esta cárcava señalan una tasa de erosión media de 176,5 t/ha y año, alcanzando valores máximos de 502,6 t/ha y año.

En la provincia de Palencia, Navarro (2002), mide la erosión en taludes del ferrocarril en el entorno de la capital mediante parcelas de clavos, en este caso calcula una tasa de erosión media de 594,34 t/ha y año, una tasa muy elevada debido a la alta erosionabilidad del suelo, a que son suelos desnudos y sin ningún tipo de control de erosión.

A escasos 8 km de la zona de este trabajo, aunque perteneciendo a la zona de 317 ha de cárcavas degradadas que se encuentran próximas a la localidad de Saldaña, Bartolomé *et al.* (2013), estiman la erosión por medio de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (Wischmeier y Smith, 1978). En esta zona se realizaron dos restauraciones

desarrolladas por Ayerbe (1930) y Azcarretazábal (1963) y este trabajo indica las tasas erosivas que había antes de la restauración y en el año 2012, el estado sin restaurar de esta cárcava se asemeja a nuestra zona de estudio en la actualidad, por lo que es interesante conocer este dato para compararlo. En este caso la tasa erosiva alcanzaba las 108 t/ha y año, un valor elevado, pero comprensible en una zona muy degradada y de altas pendientes.

3.4. Las restauraciones hidrológicas en el entorno de Saldaña

La pérdida de cubierta vegetal como consecuencia de la acción humana y el sobrepastoreo habían agrandado los procesos de erosión en la zona, provocando problemas en canales de riego, coladas de barro y pérdida de la calidad del agua en municipios cercanos a la zona de las cárcavas, cortes en la carretera Saldaña-Osorno por desprendimientos y problemas de turbidez en las aguas del río Carrión.

Ante toda esta problemática se hace necesario la necesidad de realizar una restauración hidrológico-forestal con la finalidad de reducir los procesos erosivos y consecuencias generadas por las laderas acarreadas del entorno (Navarro *et al.*, 2013).

De esta manera en 1928, se inician los estudios para restaurar la zona, siendo en 1930 cuando se redacta el primer proyecto de restauración hidrológico-forestal. Las actuaciones fueron llevadas a cabo por la entonces Confederación Sindical Hidrográfica del Duero, bajo la dirección del ingeniero de Montes D. José María Ayerbe, las cuales estaban englobadas en una zona más amplia de la provincia de Palencia, dentro de las labores para la mejora de la calidad de las aguas. Las actuaciones de restauración comenzaron en 1932, siendo unas acciones difíciles de ejecutar debido al acentuado relieve de la zona y a la falta de técnicas mecanizadas modernas, como se puede ver en la Figura 3.6.



Figura 3.6. Trabajos de restauración en 1932. Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero.

En este primer proyecto (Ayerbe, 1930) se planteó la restauración de 304,3 hectáreas del término municipal de Saldaña. Estos terrenos de propiedad comunal y particular se restauraron mediante un programa de consorcios con beneficios en función de las rentas aportadas. El proyecto planteaba la construcción de 256 diques forestales de mampostería gavionada y 680 palizadas que permitieran la fijación del terreno, disminuyesen los procesos erosivos y permitiera la instalación de una cubierta vegetal. Se repoblaron los terrenos con *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*, como especies principales. Además se pretendía la construcción de una caseta para la guardería.

En 1963, se desarrolla el segundo proyecto de restauración hidrológico-forestal para complementar las acciones de 1932, dirigido por el ingeniero de Montes D. David Azcarretazábal. En él, se plantea la restauración de 154,9 hectáreas situadas en dos parcelas, “Laderas de Valdivina y del Castillo” (140,5 hectáreas, 21,6 hectáreas ya repobladas) y “Cuestas de Triana, La Tejera y carretera de Osorno” (213,6 hectáreas, con 36 hectáreas pendientes de repoblación). Estos terrenos de propiedad comunal se restauraron mediante el programa de consorcios con beneficios en función de las rentas aportadas. El proyecto planteaba la construcción de 251 diques forestales de mampostería gavionada en 20 modelos diferentes que permitieran la fijación del terreno, disminución de los procesos erosivos y la instalación de una cubierta vegetal. Se repobló los terrenos con especies del género *Pinus*.

Los efectos generados por los proyectos de restauración son actualmente visibles en el entorno, observándose una gran mejora y reducción de los procesos erosivos.

Como se puede observar con los proyectos anteriormente citados, en diferentes zonas del entorno de Saldaña han sido acometidos proyectos de restauración, pero hay que destacar que aún quedan bastantes zonas en las que no se ha realizado ningún tipo de actuación y en las que los procesos erosivos son fuertes superando los límites tolerables de pérdidas de suelo, como es el caso de la zona donde se ubica el presente estudio.

Este estudio está enmarcado dentro de los muchos que la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia ha hecho y está realizando en las *badlands* del entorno de Saldaña. Con los que se pretende dar a conocer la importancia de las restauraciones, su eficacia, así como los beneficios.

A continuación pasamos a citar alguno de los estudios que se han realizado en la zona.

Arribas (2013) calculó los caudales y la escorrentía que se generaban en una cárcava próxima a la localidad de Saldaña en 1930 (antes de las restauraciones hidrológico-

forestales) y en 2011 para poder determinar la reducción de escorrentía y caudales que habían generado dichas restauraciones, llegando de media al 45% de escorrentía y al 35% en caudales.

Bartolomé (2012) realizó un estudio sobre la producción y emisión de sedimentos, a través de varios métodos (USLE, MUSLE...) y analizó la variación de la morfología de la cuenca y de la cubierta vegetal en el tiempo.

Campano (2012) analizó la variación de la infiltración, realizando ensayos con infiltrómetros y comparando los resultados entre las zonas desnudas y las zonas que poseen vegetación.

Ramos (2012, 2014) mediante levantamiento topográfico de 25 diques correspondientes a la zona restaurada determinó el volumen de sedimento retenido por los diques, según varios métodos y comparándolos con su propio método.

Galicia (en preparación) está realizando el proyecto de restauración de la cárcava donde se está realizando este estudio, donde ha proyectado la construcción de varios diques así como la repoblación de la zona.

Por lo que este estudio pretende dar continuidad al trabajo que viene realizando la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología en esta zona de *badlands* así como impulsar estudios sobre erosión dentro de Castilla y León porque como se ha visto en los trabajos citados anteriormente se han realizado estudios de erosión en Murcia, Pirineos, Navarra, Canarias..., pero en Castilla y León hay escasez de este tipo de estudios.

Hecho que queda demostrado en la Red Resel (Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evolución de la Erosión y la Desertificación del proyecto LUCDEME (Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo). Esta Red se inicia en 1995 con el objetivo fundamental de hacer un seguimiento directo de los procesos físicos de desertificación. La red está compuesta por campos experimentales, representativos de los diferentes paisajes erosivos de España, cuenta con 49 estaciones experimentales pertenecientes a 21 centros asociados, de esas 49 únicamente tres pertenecen a Castilla y León, como se puede comprobar en la Figura 3.7. que señala donde están distribuidos estos centros dentro de la geografía española.



Figura 3.7. Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y Desertificación (RESEL) (MAGRAMA, 2007).

4. Objetivos

El objetivo principal del estudio es determinar la erosión que se produce en la zona, mediante el empleo de nuevos métodos de medición, junto con nuevas tecnologías (medición mediante distanciómetro láser) y la evaluación de la metodología creada para que se pueda utilizar en otras zonas con garantías de buenos resultados. Para poder determinar lo anteriormente descrito, se han desarrollado los siguientes objetivos particulares:

- Descripción detallada de la zona de estudio, analizando las variables que influyen en la producción de erosión (clima, edafología, vegetación, topografía, hidrología).
- Creación de una metodología de medida de erosión mediante el empleo de un distanciómetro láser, así como su evaluación previa para determinar su validez mediante una prueba piloto.
- Implantación de 13 perfiles de estudio de erosión abarcando las zonas más representativas de la cárcava.
- Análisis de la cuantía de erosión producida en cada uno de los perfiles, volviendo a medir cada uno de ellos, en un periodo de 6 meses y tras las tormentas torrenciales producidas durante esta primavera.
- Estimación de la tasa erosiva producida durante esos periodos de tiempo, mediante el cálculo de las superficies de erosión y deposición con el software informático AutoCAD MAP 3D 2014.
- Estudio de la variación del perímetro y superficie de la cuenca, mediante su medición con un GPS de precisión centimétrica y la comparación de la divisorio obtenida al principio del estudio y tras el paso de 9 meses coincidiendo con el final del trabajo.
- Comparación de los resultados obtenidos con tasas erosivas de otras zonas similares y con otras metodologías con el objetivo de contrastar los resultados con otros estudios.

5. Descripción de la zona de estudio

5.1. Localización y situación

La zona de estudio se encuentra ubicada en la pedanía de Villantodrigo, perteneciente al término municipal de Quintanilla de Onsoña, a escasos 8 km del municipio de Saldaña, en la provincia de Palencia, dentro de la comunidad autónoma de Castilla y León. La zona pertenece a la comarca de Páramos y Valles, comarca natural de Vega-Valdavia, subcomarca de Vega y su red hidrográfica a la Confederación Hidrográfica del Duero.

En la Figura 5.1, se puede ver la situación de Villantodrigo dentro de la provincia de Palencia.



Figura 5.1. Localización de Villantodrigo (Palencia).

La cárcava de estudio, se sitúa a las afueras del pueblo de Villantodrigo, se accede a ella a través de la carretera que enlaza el municipio anteriormente citado, con Quintanilla de Onsoña. Al margen izquierdo del río Valdecuriada.

Las coordenadas geográficas de la zona son: 42° 29'19,53'' N; 4° 39'28,26'' W y las coordenadas UTM 30N son: X: 362583, Y: 4704133.

La Figura 5.2, muestra la situación más concreta de la cárcava de estudio, en una imagen que se ha obtenido a través de SigPac del MAGRAMA.

Como se puede observar en la imagen anterior, se trata de una cárcava bastante grande (casi 4 ha de superficie), donde las laderas laterales tienen fuerte pendiente y grandes procesos erosivos. También se ve como las laderas que tienen orientación norte, donde hay mayor humedad están más pobladas de vegetación que las laderas con orientación sur, que están prácticamente sin vegetación. Cabe destacar que en esta zona no se ha llevado ninguna actuación de corrección de cárcavas, ni de control de la erosión.

En la Figura 5.4, se muestra otra imagen de la cárcava de estudio vista desde aguas abajo para poder observar la cabecera de la misma, que no se mostraba en la imagen anterior.



Figura 5.4. Cabecera de la cárcava de estudio.

Si se observa la cabecera de la cárcava, se ve como es una zona activa donde se siguen produciendo problemas muy graves de erosión. La cabecera también tiene laderas con fuertes pendientes y vemos como en el lecho de la cárcava cuando se producen precipitaciones intensas o durante varios días circula un ligero caudal de agua.

5.2. Climatología

Se utilizaron datos procedentes de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) relativos a las estaciones 2370 (Saldaña) y 2370A (Instituto Laboral de Saldaña). Se usaron los datos de la estación 2370, debido a una mayor amplitud de la serie de datos y por estar más cerca de la zona de estudio; mientras que la 2370A se ha empleado para comparar y contrastar datos. Se detectaron errores sistemáticos en ambas estaciones que fueron corregidos por el método de dobles acumulaciones y las series se completaron por corrección ortogonal (Bartolomé, 2012; Galicia, en preparación) (Ver Anejo Climatología).

5.2.1. Año tipo

Con los datos de precipitaciones y temperaturas de la serie, se halló la media y como consecuencia se pudo elaborar un “año tipo” cuyos datos de precipitaciones se pueden ver en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Precipitaciones medias mensuales.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P. media (mm)	57,9	46,2	44,2	50,7	55,7	45,9	23,4	22,5	39,2	67,0	61,5	59,5
Precipitación media anual (mm)	573,7											

Como se puede observar la precipitación media anual es de 573,7 mm, repartiéndose 163,6 mm en invierno, 150,6 mm en primavera, 91,8 mm en verano y 167,7 mm en otoño. En la Figura 5.5, se muestra gráficamente la distribución anual de las lluvias.

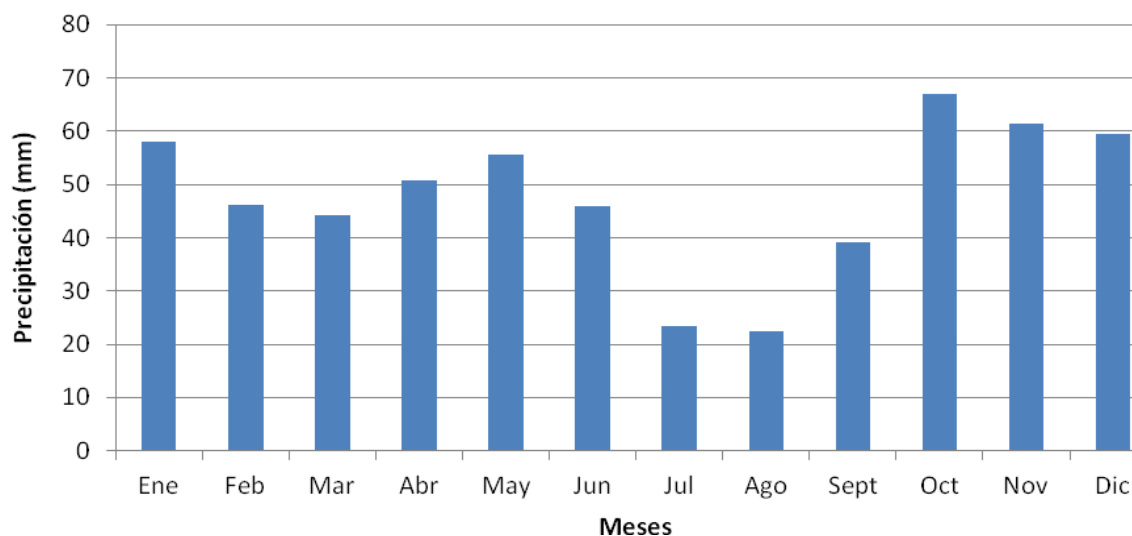


Figura 5.5. Distribución anual de las precipitaciones medias.

Los datos resumen de temperaturas los podemos ver en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Datos de temperaturas mensuales.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	MEDIA
tm (°C)	2,9	4,2	7,4	9,4	13,2	17,3	19,7	19,9	16,5	11,6	6,2	3,2	10,9
T (°C)	7	9,7	13,6	15,7	20,1	24,8	27,7	27,6	23,6	17,4	10,7	6,9	17,1
t (°C)	-1,2	-1,4	1,1	3,2	6,5	9,9	11,7	12,2	9,4	5,9	1,6	-1	4,8
Ta (°C)	19	20	24,5	29	33,5	37	36	37	35	28,5	25	16,5	37
Año	2013	2000	2002	2011	2001	2012	2011	2012	2006	2011	1997	2008	2012
T'a	13,9	16,3	20,2	241	289	325	345	346	30,6	241	181	134	35,2
ta (°C)	11,5	-11	-10,5	-4,5	-2,5	1	2,5	3	-0,5	-4	-9	-16	-16
Año	2010	2012	2005	2009	2004	1998	2009	2010	2005	2010	2001	2009	2009
t'a	-7,2	-6,1	-5,3	-2,7	-3	4	5,5	5,9	2,8	-5	-4,2	-6,9	-9,1

tm: temperatura media anual; **T:** temperatura media de las máximas anuales; **t:** temperatura media de las mínimas anuales; **Ta:** Temperatura máxima absoluta; **T'a:** temperatura media de las máximas absolutas; **ta:** temperatura mínima absoluta; **t'a:** temperatura media de las mínimas absolutas

Como resumen de la tabla anterior se concluye que la temperatura media anual es de 10,9 °C y el periodo frío en el que la temperatura media es inferior a 7°C, se extiende desde noviembre hasta marzo y se carece de periodo cálido (temperaturas medias superiores a 30°C). La Figura 5.6, muestra el climodiagrama elaborado para la zona de estudio.

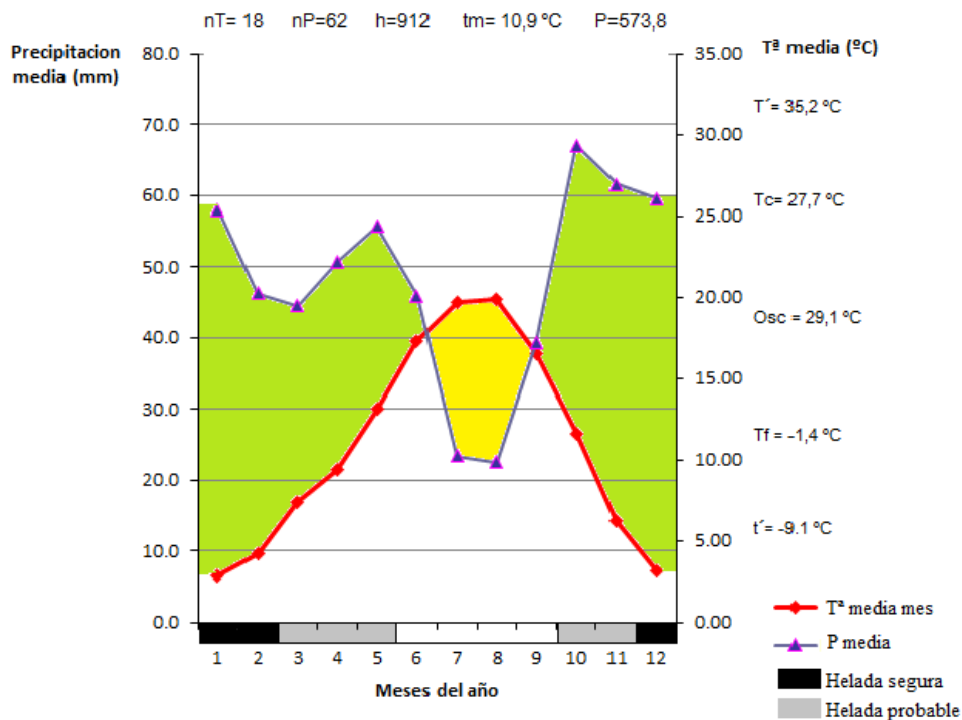


Figura 5.6. Climodiagrama (Walter y Lieth, 1960).

Analizando el climodiagrama, se ve como la zona libre de heladas se sitúa en los meses estivales; mientras que los periodos de heladas seguras coinciden con los meses de invierno (Diciembre, Enero y Febrero). El periodo de sequía (periodo en que la temperatura media está por encima de las precipitaciones) es de 3 meses y centrados también en la época de verano.

5.2.2. Índices Climáticos

Para caracterizar el clima se han calculado diferentes índices climáticos, pluviométricos y bioclimáticos, que definen las características climáticas de la zona de estudio. Los resultados de estos índices se pueden observar en las Tablas 5.3 y 5.4 respectivamente.

Tabla 5.3. Índices climáticos.

Índice	Valor	Clasificación
Pluviosidad (Lang, 1920)	52,6	Zona húmeda de estepa o sabana
Aridez (Martonne, 1906)	27,45	Zona subhúmeda de prados y bosques
Emberger (1932)	74,97	Clima mediterráneo húmedo
Dantín- Revenga (1941)	1,9	Zona húmeda de estepa o sabana
Aridez (UNEP, 1997)	0,86	Clima húmedo
Continentalidad (Gorezynski, 1920)	21,78	Clima continental
Índice de Turc (1961)	671,22	Clima húmedo

Tabla 5.4. Índices pluviométricos.

Índice	Valor	Clasificación
Agresividad del clima (Fournier, 1960)	27,89 mm	Bajo
Erosividad de la lluvia (1959)	75,71 hJ.cm.m ⁻² .h ⁻¹	Erosividad baja a moderada
Irregularidad pluviométrica	3,3	Zona con irregularidad pluviométrica

Analizando los índices calculados, se puede observar como el índice de Lang, Dantín-Revenga y UNEP clasifican la zona como húmeda, aunque el dato de precipitaciones no muestra que sean excesivamente altas (nos encontramos por debajo de la precipitación media de España). El índice de Emberger señala que estamos en un lugar de clima submediterráneo húmedo, mientras que Gorezynski clasifica la zona como clima continental.

En cuanto a los índices pluviométricos, el índice de irregularidad pluviométrica, señala una acusada irregularidad pluviométrica y el factor de erosividad de la lluvia (factor R) señala una capacidad baja–moderada.

La clasificación bioclimática de la zona, según el índice de Mediterraneidad de Rivas–Martínez (1987), indica que Villantodrigo está dentro de la región mediterránea.

Según la clasificación fitoclimática de Allué Andrade (1990), Villantodrigo se encuentra en el subtipo VI (IV)₁ cerca de los límites del VI (IV)₁, siendo ambos nemoromediterráneos genuinos. El subtipo VI (IV)₁ puede existir en diferentes litologías predominando los grupos planicaducifolios marcescentes.

Según el mapa de las series de vegetación de Rivas-Martínez (1987), Villantodrigo se sitúa en la serie “19b” que se denomina de la siguiente manera: Serie supra-mesomediterránea castellano-alcarreño-manchega basófila de *Quercus faginea* (Rivas-Martínez, 1987). Esta serie tras la última actualización del año 2011, pasa a denominarse: Serie climatófila castellana calcícola mediterránea pluviestacional oceánica meso-supramediterránea seco-subhúmeda de los bosques de *Quercus faginea* y *Cephalanthera rubra* con *Lonicera hispanica* y *Paeonia humilis* (*Cephalanthero rubrae-Quercus fagineae sigmetum*) (Rivas-Martínez, 2011).

Analizando el índice de Gandullo-Serrada (1977) o Índice de Productividad Forestal (IPPF), su valor es de 7,12 m³/ha y año, lo que encuadra la zona dentro de la clase III, tierras que tienen limitaciones moderadas para el crecimiento de bosques productivos.

En conclusión podemos decir que con los datos aportados por los índices, nos encontramos en un lugar con un clima mediterráneo continental, donde los inviernos son largos y fríos con un período amplio de heladas seguras, mientras que los veranos son cortos, donde se produce sequía.

5.3. Edafología

5.3.1. Clasificación de los suelos de la zona de estudio

Según el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos (Saldaña), E. 1:50.000, (MAPA, 1977) y según la clasificación americana de suelos (Soil taxonomy, 7^a aproximación, 1975) los suelos de la vega del Río Valdecuriada (afluente del Río Carrión), pertenecen al orden de los *entisoles* suborden *orthent*.

Los suelos desnudos de las cárcavas se podrían incluir dentro del orden de los *entisoles*, suborden *orthents* (NRCS, 2003) o *leptosoles* (FAO, 1998). Estos se caracterizan por no

poseer horizontes de diagnóstico definidos, procedentes de una roca madre joven incoherente, en fuertes pendientes y sometidos a procesos de erosión y aporte.

Sobre la roca madre apenas se diferencia un horizonte superficial, que no es más que la regolita, generada por los ciclos de helada y soleamiento que desaparece con rapidez debido a los fuertes procesos erosivos dejando al descubierto la matriz arcilloarenosa (Navarro *et al.*, 2013).

Para poder tener una idea de las características y propiedades de los suelos de la cárcava se decidió tomar varias muestras de suelo, concretamente se abrieron dos calicatas, en cada una de ellas se tomaron muestras alteradas e inalteradas. Esas calicatas se sitúan, una en la parte baja de la cárcava (Muestra 1) y otra en la parte más alta, casi en la cabecera (Muestra 2). Las muestras alteradas se llevaron a analizar al Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (ITAGRA). Los resultados de estos análisis completos se pueden ver en el Anejo Edafológico.

5.3.2. Propiedades del suelo

Para poder caracterizar de manera adecuada un suelo, las propiedades físicas y químicas del terreno son muy importantes.

- Textura

La clasificación de los suelos de la cárcava según su textura se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Textura de cada muestra (USDA).

Muestra	% arena	% limo	% arcilla	% arena muy fina	Textura
1	26,16	24,26	49,56	14,56	ARCILLOSA
2	23,16	30,28	46,56	12,56	ARCILLOSA

El triángulo de texturas construido con los datos anteriores, se muestra en el Anejo Edafológico.

- Estructura

En campo se pudo observar que los agregados estaban consolidados en una masa uniforme sin apenas grietas en todos los suelos, excepto la capa de costra y regolito del suelo desnudo, lo que corresponde con una estructura masiva.

- Profundidad

Este parámetro define el espesor en centímetros del suelo hasta el lecho de roca.

La mayoría del suelo de la zona de estudio se caracteriza por tener un suelo desnudo, formado por una capa de costra y regolito, de apenas 10 cm de espesor y la cual se pierde debido a los fuertes procesos erosivos que allí ocurren.

La zona provista de vegetación el suelo está protegido por la cobertura herbácea, de los fenómenos erosivos, pero aun así en un suelo poco profundo.

- Permeabilidad

Se calculó mediante el método gráfico de *Rawls y Brakensiek* (1989), que a través del porcentaje de arena y arcilla, entrando con ellos en un ábaco nos da el valor (ver Anejo Edafológico).

Una vez obtenidos los valores, por medio del ábaco, se clasifican los suelos de la cárcava con la clasificación que propone USDA (2003) llegando a la conclusión de que los suelos de la zona de estudio tienen una permeabilidad que está en el rango de bajo (muestra 1; permeabilidad = 0,277 mm/h) a moderadamente bajo (muestra 2; permeabilidad = 0,436 mm/h). Si estos suelos los clasificamos según lo que propone Almorox *et al.* (1994), estamos en unos suelos de permeabilidad muy lenta, para ambas muestras.

- Capacidad de retención de agua del suelo

La determinación de este parámetro se realiza según la fórmula de Gandullo (1985). Los resultados obtenidos dicen que los suelos de la zona de la cárcava tienen una capacidad de retención de agua muy baja, que apenas llega a los 28 mm, un valor escaso para suelos arcillosos, esto puede ser debido a la escasa profundidad y elevada pendiente.

- Reacción del suelo

Con el pH obtenido para las muestras y siguiendo el criterio USDA (2003), los suelos de la cárcava se clasifican como: moderadamente básicos (Muestra 1, pH = 8,25) y fuertemente básicos (Muestra 2, pH = 8,67).

- **Salinidad**

Se mide a través de la conductividad eléctrica del suelo, con los valores obtenidos se realiza la clasificación a través de lo que propone USDA (2003). Los valores hallados en nuestros suelos son de 0,51 y 0,15 dS/m para la muestra 1 y 2 respectivamente, encontrándose en la clase 0, es decir, suelos no salinos.

- **Contenido en materia orgánica**

Tal y como propone USDA (2003), la clasificación de los suelos según su contenido en materia orgánica sea por la cantidad de materia que hay en los 10 cm primeros de suelo. En este caso, como se vio en campo, y así lo confirmaron los análisis de ITAGRA, tenemos un contenido en M.O. muy deficiente (<0,23%) para ambas muestras de la zona de estudio.

- **Abundancia de calcio**

Observando el resultado de los análisis, se observa como la cantidad de carbonatos es muy baja en todas las muestras, por lo que estamos ante suelos descarbonatados con una presencia de caliza activa muy baja.

- **Cationes de cambio**

Analizando el informe proporcionado por ITAGRA y cuyos resultados se pueden ver en el Anejo Edafológico, la cantidad de calcio es de 42,9 y 37,6 meq/100g para la muestra 1 y 2 respectivamente por lo que se llega a la conclusión de que la cantidad es muy alta para ambas muestras, mientras que la cantidad de potasio (85 y 94 mg/kg respectivamente) y magnesio (1,57 y 1,12 meq/100g, respectivamente) son bajas.

- **Erosionabilidad del suelo**

Se define como la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados, en el Anejo Edafológico se han calculado varios índices de erosionabilidad. Uno de los índices más representativos, es el factor K (Wischmeier y Smith, 1978) y cuyos resultados se muestran a continuación:

Muestra 1 → $K = 0,36$ → Susceptibilidad media a ser erosionados.

Muestra 2 → $K = 0,20$ → Susceptibilidad baja a ser erosionados.

5.4. Geología y litología

En la provincia de Palencia tenemos dos grandes conjuntos geológicos, los terrenos paleozoicos del Norte y las zonas pertenecientes a la cuenca terciaria en el centro y en el sur de la provincia. En la zona montañosa del norte, podemos encontrar terrenos Mesozoicos, pero se presentan en pequeñas bandas, en las líneas de contacto con la cuenca terciaria y el cuaternario en la vega de los ríos (Ceñat *et al.*, 1988) (Figura 5.7).

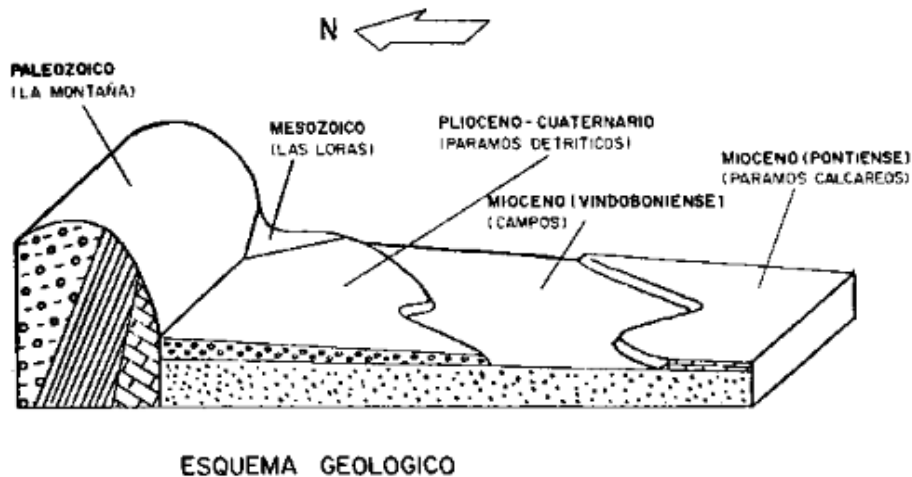


Figura 5.7. Esquema geológico de la provincia de Palencia (Ceñat *et al.*, 1988).

En la Figura 5.8, extraída del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se puede ver la hoja correspondiente a la zona de estudio del Mapa Geológico Nacional donde viene detallado, las formaciones geológicas que allí se encuentran.

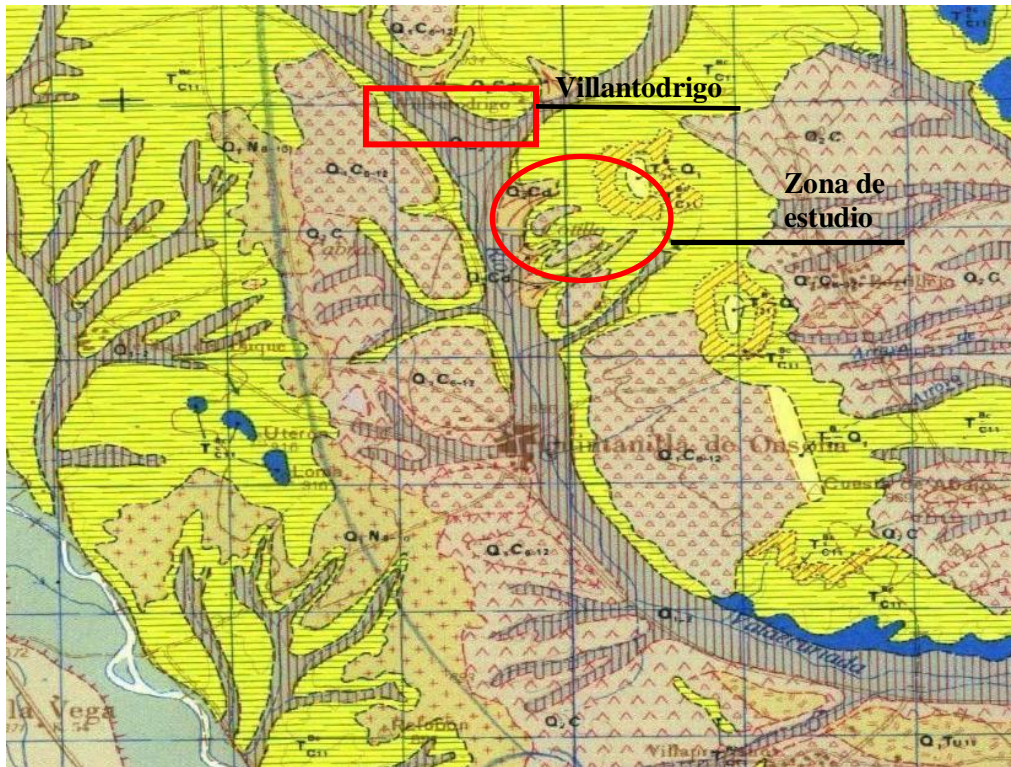


Figura 5.8. Mapa Geológico de Villantodrigo (IGME, 1982). Fuente: Web IGME.

A continuación en la Figura 5.9, se muestra la leyenda del mapa anterior.

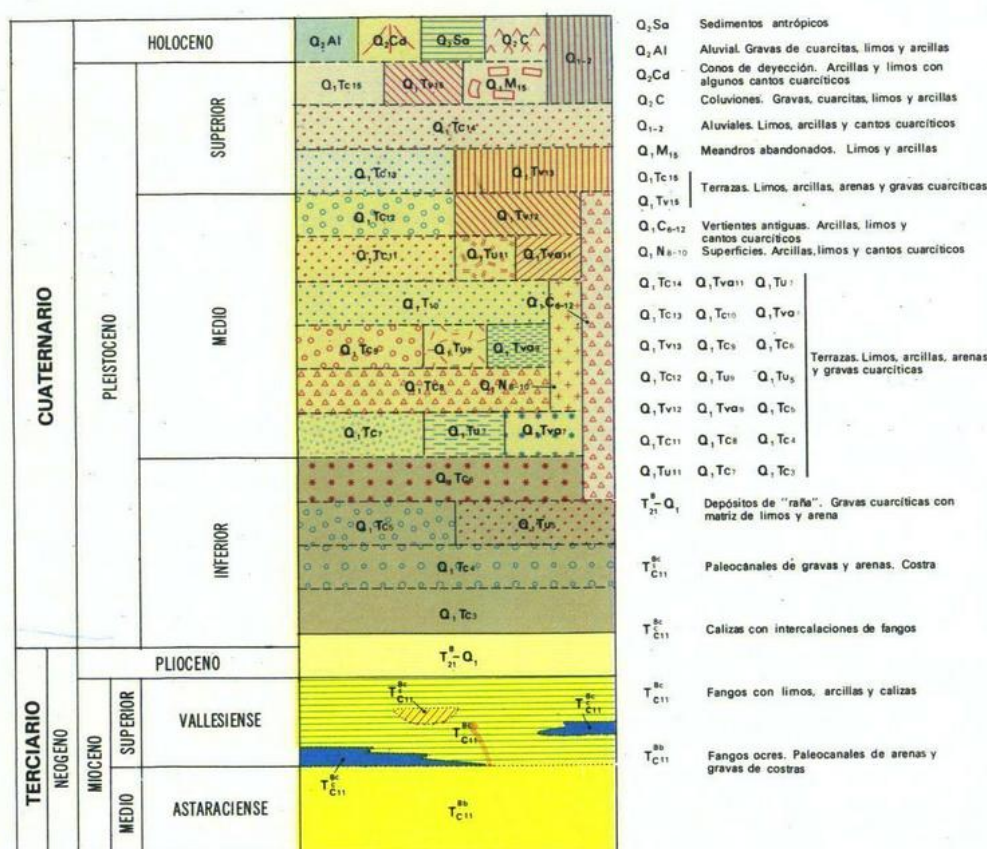


Figura 5.9. Leyenda del mapa Geológico de Villantodrigo (IGME, 1982). Fuente: Web IGME.

Si observamos el mapa, vemos como las principales formaciones geológicas que hay en la zona son las siguientes:

- Q₂Cd: Conos de deyección.
- T_{c11}^{8c}: Fangos con limos, arcillas y calizas.
- T_{c11}^{8b}: Fangos ocre. Paleocanales de arenas y gravas de costras.
- T_{c11}^{8cc}: Calizas con intercalaciones de fango.

Una vez definidas las formaciones que encontramos en la zona de estudio, a continuación se describen brevemente con la información extraída del Mapa Geológico Nacional de Carrión de los Condes (IGME, 1982).

- Conos de deyección

Se localizan aisladamente o seriados en las terrazas bajas del Carrión y Ucieza derivando de ellas o de paleovertientes.

- Fangos con limos, arcillas y calizas

Los fangos suelen ser ocre, con niveles rojos intercalados (en campo se pudo ver la presencia de un estrato rojizo), con un tamaño medio comprendido entre 0,02–0,002 mm. Existen intercalaciones de paleocanales arenosos, poco numerosos. El contenido en carbonatos es alto y el pH suele variar entre 7,1 y 8,6; como se puede observar anteriormente estos valores de pH coinciden con los de nuestros suelos de la cárcava que toman valores de 8,25 y 8,67 respectivamente.

- Fangos ocre. Paleocanales de arenas y gravas de costras

Está definida por la presencia de fangos de tonos ocre, con niveles de paleocanales poco importantes con gravilla y arena. Entre los fangos se intercalan igualmente algún nivel calcimorfo ocre difuso, y capas rojas (coincidiendo con el estrato rojizo observado en campo) de zonas de encharcamiento de considerable extensión lateral. En líneas generales, los fangos suelen estar carbonatados, con contenido en carbonato cálcico muy variable.

5.5. Hidrología

La cuenca vertiente de estudio se sitúa en el margen izquierdo del río Valdecuriada, al que vierte sus aguas. Por lo tanto se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrográfica del Duero, el río Valdecuriada vierte sus aguas en el río Ucieza y éste al río Carrión. El río Carrión nace dentro del Parque Natural de Fuentes Carrionas y Fuente Cobre y recorre la provincia de Palencia de norte a sur, pasando por la propia capital y vertiendo sus aguas al río Pisuerga en la localidad de Dueñas, y el Pisuerga vertiéndolas a su vez en el río Duero. En la Figura 5.10, se observa la cuenca del Duero y la localización de la zona de estudio dentro de esta.

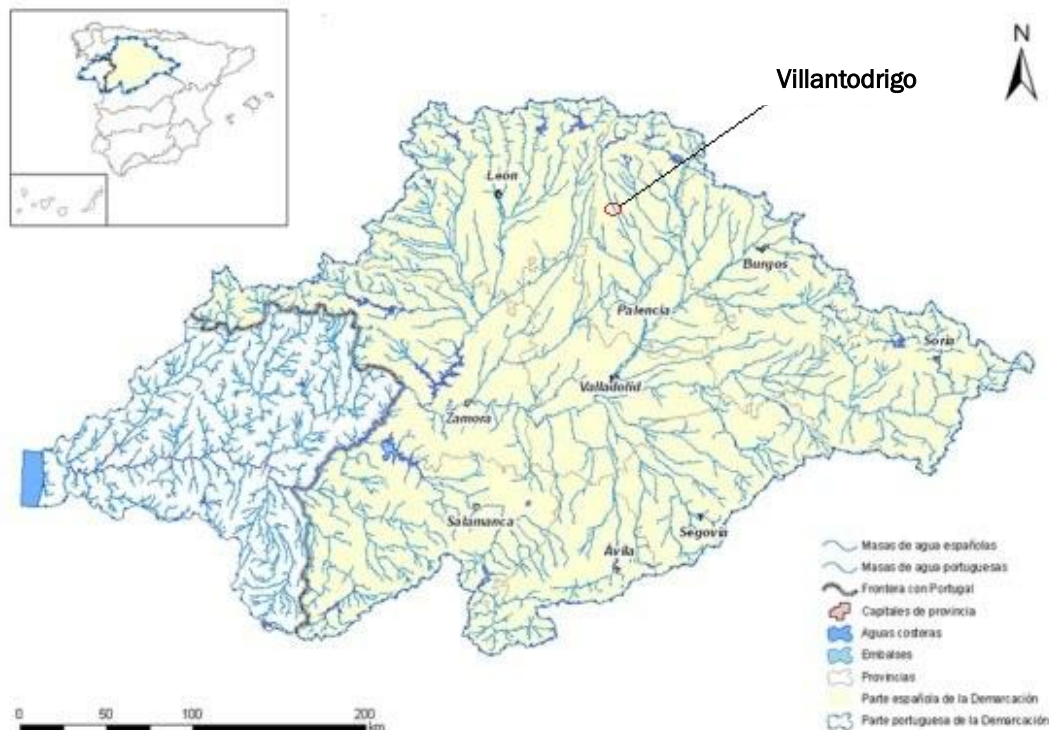


Figura 5.10. Cuenca Hidrográfica del Duero. (Modificado de la CHD, 2011).

5.5.1. Cuenca de estudio

Estamos ante una cuenca exorreica, puesto que el agua que recoge va a parar a un punto fuera de ella. Una cuenca pequeña, de 37228,46 m² con un perímetro de 1054 m y longitud de 415,73 m habiendo una diferencia de altitud entre el punto más alto y el más bajo de 66 m. En cuanto al cauce principal tiene una longitud de 369 m. En la Figura 5.11 se muestra la cuenca con su perímetro, su divisoria y su divisoria de escorrentía directa.

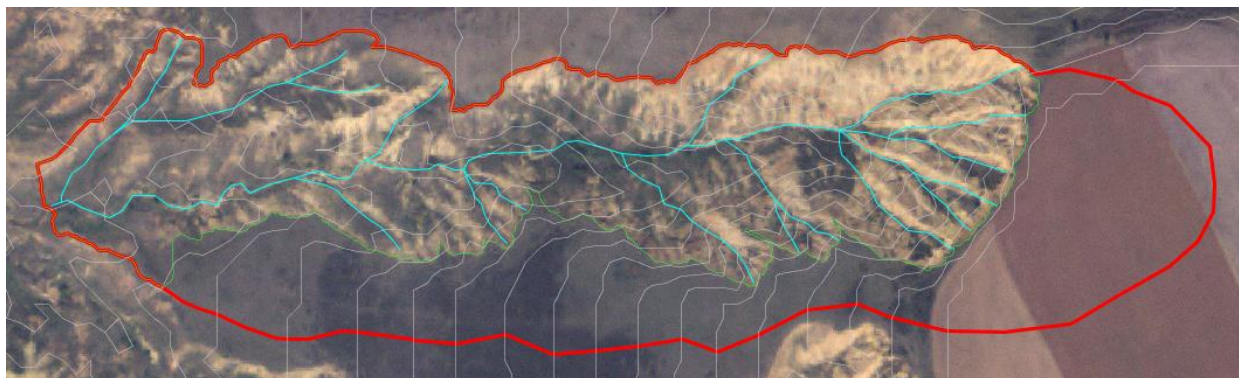


Figura 5.11. Divisoria y cauces de la cuenca de estudio. Rojo: Divisoria de la cuenca; Verde: divisoria de escorrentía directa; Azul: principales cauces de la cuenca; Gris: curvas de nivel cada 5 m.

5.5.2. Parámetros físicos de la cuenca de estudio

En la Tabla 5.6, se muestra un resumen de estos parámetros, cuyos cálculos detallados se pueden ver en el Anejo Hidrológico.

Tabla 5.6. Parámetros físicos de la cuenca vertiente total.

Parámetros	Valor	Clasificación
Superficie de la cuenca (m ²)	37228,46	Muy pequeña
Índice de compacidad	1,51	Cuenca oblonga
Relación de elongación	0,27	Cuenca alargada
Altura media (m)	34,88	
Altitud media (m)	945,88	
Lado mayor rect. equiv.(m)	435	
Lado menor rect. equiv. (m)	85,5	
Relación de relieve	0,159	Relieve pronunciado
Índice de pendiente relativo (%)	38,9	Relieve pronunciado
Pendiente media cuenca (%)	35,5	Relieve pronunciado
Coef. Masividad <i>Martonne</i> (m/km ²)	936,88	
Coef. orográfico de <i>Fournier</i> (m ² /ha)	326,8	Relieve acentuado

A modo de resumen de la tabla anterior, según la Directiva Marco de Aguas 2000/60/CE clasifica la cuenca como muy pequeña y con una alta susceptibilidad a tormentas. El índice de forma cataloga la cuenca como oblonga aunque en el límite con una cuenca ovalada, sin embargo, la relación de elongación indica que es una cuenca alargada.

La pendiente media de la cuenca es de 38,9%, se trata de una zona bastante abrupta sobre todo en la zona de cabecera, ya que luego la pendiente va suavizando poco a poco. *Fournier y Martonne* coinciden en que estamos en un lugar con relieve pronunciado. A continuación en las Figuras 5.12 y 5.13 se muestran la curva hipsométrica y la de frecuencias respectivamente.

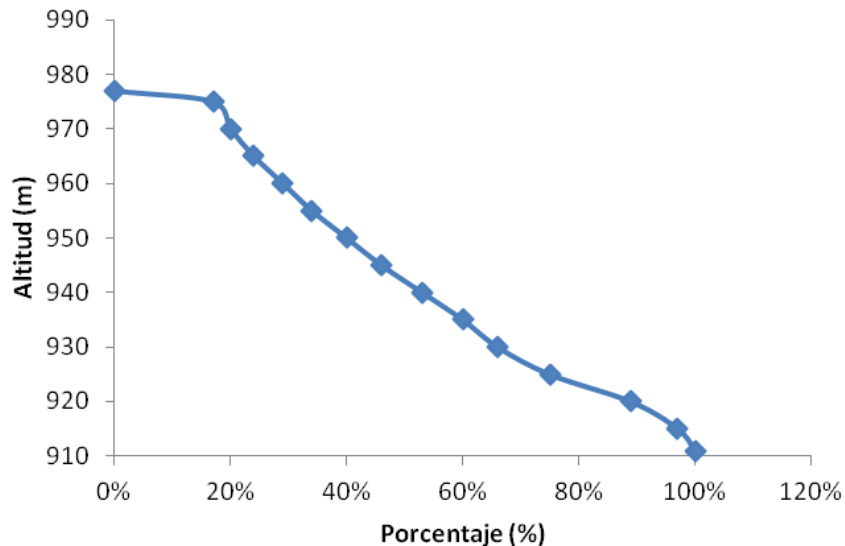


Figura 5.12. Curva hipsométrica de la cuenca de estudio.

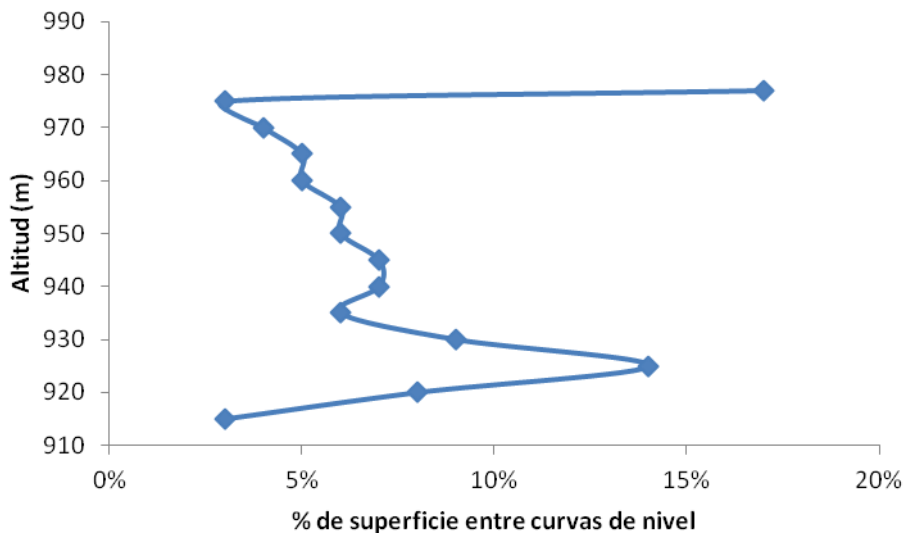


Figura 5.13. Curva de frecuencias de la cuenca de estudio.

Si analizamos la curva hipsométrica, se puede observar como en la parte superior de la cuenca la pendiente es baja, se corresponde con la zona de páramo donde hay un cultivo de cereal, para posteriormente entrar en una zona de fuerte pendiente, que según

desciende en altitud se va suavizando. Esta distribución hipsométrica se corresponde con un perfil de encajamiento.

5.5.3. Parámetros morfológicos de la red de drenaje

En la Tabla 5.7, podemos ver un resumen de estos parámetros.

Tabla 5.7. Parámetros físicos de la red de drenaje.

Parámetro	Valor	Clasificación
Longitud del cauce principal (m)	369	
Número total de cauces	22	
Pendiente media del río (%)	17,6	Carácter torrencial
Tiempo de concentración (horas)	0,195	Inundaciones relámpago
Densidad de drenaje (km/km ²)	30,52	Alta- Fina
Canal de alimentación (km ² /km)	0,033	
Distancia de escorrentía (km ² /km)	0,0163	
Alejamiento medio	1,91	
Coef. Torrencialidad	13936,07	Alta torrencialidad
Frecuencia de cauces (cauces/km ²)	590,9	
Radio de bifurcación N1	4,25	
Radio de bifurcación N2	4	
Radio de bifurcación total	4,125	Carácter torrencial

Como se observa el cauce principal de la cuenca no tiene una gran longitud, unido a su elevada pendiente (17,2%) y un tiempo de concentración pequeño, de apenas 11 minutos hace que ante episodios de fuertes precipitaciones, la escorrentía superficial salga muy rápida y pueda generar caudales punta que creen un golpe de agua que afecte a las infraestructuras situadas aguas abajo.

El coeficiente de torrencialidad y la frecuencia de cauces son bastante elevados, lo que indica la torrencialidad de la zona. Por último los radios de bifurcación son similares entre sí, lo que señala una uniformidad litológica.

En la Figura 5.14, observamos el perfil longitudinal del cauce principal.

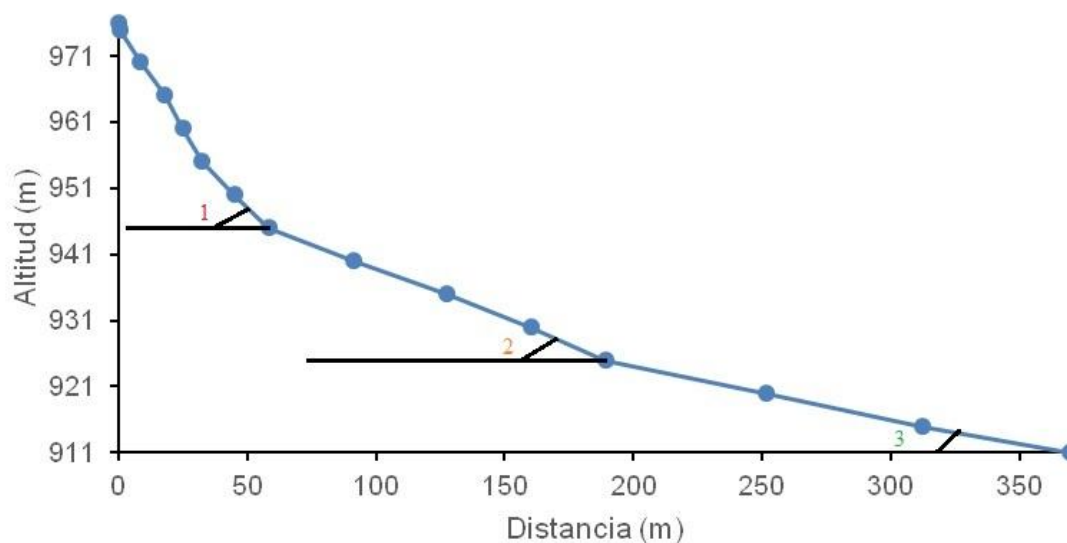


Figura 5.14. Perfil longitudinal del cauce principal.

Analizando el perfil anterior, se puede ver que es de tipo torrencial. Desciende rápidamente en su inicio para luego ir disminuyendo poco a poco su pendiente. Se puede observar tres zonas de diferente pendiente. La zona de cabecera (1) caracterizada por fuertes pendientes (53,44 %), una zona intermedia (2) donde la pendiente se va suavizando (15,26 %) y finalmente la zona cercana a la sección de cierre (3) en la que la pendiente ya es más tendida (5,88 %).

5.6. Vegetación

En la lucha contra la erosión la vegetación toma un papel muy importante, ya que realiza una función de protección del suelo frente a los agentes erosivos, evitando y ralentizando el avance de la erosión. Algunas de las acciones más importantes que realiza son las siguientes:

- Frena la velocidad del agua de escorrentía, y como consecuencia aumenta la infiltración.
- El sistema radical de las plantas mejora la capacidad de infiltración del agua.
- Forma una capa protectora interceptando las gotas de lluvia antes de que impacten contra el suelo, evitando la compactación del terreno y la erosión por salpicadura.
- La vegetación gracias a la transpiración extrae agua edáfica, manteniendo el suelo por debajo de la capacidad de campo y retardando así la aparición de escorrentía.

Como vemos todas las acciones contribuyen al retraso en la formación de escorrentía superficial durante un episodio de lluvia y como consecuencia disminuye la erosión hídrica y laminar.

5.6.1. Clasificación biogeográfica y bioclimática

Esta clasificación se realiza según la propuesta por Rivas-Martínez (2007), que para la zona de estudio se corresponde con las siguientes unidades biogeográficas:

- Reino Holártico
- Región Mediterránea
- Subregión Mediterránea Occidental
- Provincia Mediterránea Ibérica Occidental
- Subprovincia Carpetano Leonesa
- Sector Planileonés
- Distrito Valdaviés

5.6.2. Vegetación potencial

Se denomina vegetación potencial a la comunidad vegetal estable en un área determinada, que representa la última etapa de la sucesión progresiva (Rivas-Martínez, 2007). La vegetación está condicionada por diversos factores como condiciones climáticas, factor humano, suelo, orografía del terreno...

Las series de vegetación se diferencian atendiendo a su tipología y al paisaje que generan en varios grupos: climatófilas (se encuentran en terrenos donde solo reciben agua a través de las lluvias), edafoquerófilas (sobre suelos xerfíticos) y edafohigrófilas (sobre suelos azonales).

Según el mapa de las series de vegetación de Rivas-Martínez (1987), Villantodrigo se sitúa en la serie "19b" que es la siguiente: Serie supra-mesomediterránea castellano-alcarreño-manchega basófila de *Quercus faginea* (Rivas-Martínez, 1987). Esta serie tras la última actualización del año 2011, pasa a denominarse: serie climatófila castellana calcícola mediterránea pluiestacional oceánica meso-supramediterránea seco-subhúmeda de los bosques de *Quercus faginea* y *Cephalanthera rubra* con *Lonicera hispanica* y *Paeonia humilis*. (*Cephalanthero rubrae-Quercus fagineae sigmetum*) (Rivas-Martínez, 2011).

Aunque también la zona de estudio se encuentra influenciada debido a su cercanía por la serie “18a” denominada: serie supramediterránea carpetano-ibérico-alcarreña subhúmeda silicícola de *Quercus pyrenaica* (Rivas-Martínez, 1987) que tras la actualización de 2011 pasa a llamarse: Serie climatófila guadarrámica celtibérico-alcarreña y oroibérica silicícola mediterránea pluviestacional oceánica supramediterránea subhúmedo-húmeda de los bosques de *Quercus pyrenaica* y *Luzula forsteri* con *Milium vernale* y *Cistus laurifolius* (*Luzulo forsteri- Querco pyrenaicae sigmetum*) (Rivas-Martínez, 2011). La identificación de estas dos series se puede ver en la Figura 5.15.



Figura 5.15. Identificación de las series climatófilas de la zona de estudio.

La serie “19b” en su etapa madura o clímax se corresponde con un bosque denso en el que predominan los árboles caducifolios o marcescentes (*Aceri-Quercion fagineae*). Estos bosques suelen estar sustituidos por espinares (*Prunetalia*) y pastizales vivaces en los que abundan caméfitos (*Brometalia*, *Rosmarinetalia*, etc). Se hallan ampliamente distribuidos por las provincias corológicas aragonesa, castellano-maestrazgo-manchega y bética pudiendo sobre ciertos suelos profundos descender al piso meso mediterráneo lo que confiere una gran diversidad florística (Rivas-Martínez, 1987).

Una vez descrita la serie “19b”, se describe la serie “18a” El clímax de estas series corresponde a robledales densos, bastante sombríos, creadores de tierras pardas con

humus tipo mull (*Quercenion pyrenaicae*). Las etapas seriales de sustitución correspondientes a etapas degradadas son: en primer lugar, los matorrales retamoides o piornales (*Gestion florideae*), que prosperan todavía sobre suelos muliformes bien conservados y los brezales o jarales (*Ericenion aragonensis*, *Cistus laurifolius*), donde los suelos tienden a podzolizarse en mayor o menor medida por la influencia de una materia orgánica sin descomponer. Este proceso edáfico se manifiesta preferentemente en los brezales de ombroclimas húmedos y en menor medida en los jarales subhúmedos (Rivas-Martínez, 1987).

5.6.3. Vegetación actual

Al ser una cuenca de superficie reducida, no llega a las 4 hectáreas, el inventario se realizó muestreando a pie toda la superficie de la cárcava, recogiendo las especies que allí se encuentran e identificándolas posteriormente en gabinete.

Se puede destacar que en la cárcava se distinguen principalmente tres zonas, teniendo en cuenta la cobertura de vegetación, que son las siguientes: laderas de orientación sur, donde la vegetación es prácticamente nula y de porte herbáceo; laderas de orientación norte donde hay una cobertura de vegetación mayor, también de porte herbáceo y el fondo de la cárcava que presenta una buena cobertura de vegetación e incluso especies de matorrales, que puede ser debido a que es una zona con suelos más profundos y una mayor humedad, puesto que es la zona donde va a parar el agua recogida por la cuenca. La zonificación anteriormente descrita se puede ver en la Figura 5.16.



Figura 5.16. Zonificación de la cárcava en función de la cobertura de vegetación.

Las principales especies vegetales que se han observado en la zona de estudio ordenadas por estratos y familias son las siguientes:

- Estrato arbóreo: No hay especies pertenecientes a este estrato.
- Estrato arbustivo: Se puede ver en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Especies, familia del estrato arbustivo.

Especie	Familia
<i>Thymus mastigoforus</i>	<i>Lamiaceae</i>
<i>Thymus zygis</i>	<i>Lamiaceae</i>
<i>Linum suffruticosum</i>	<i>Linaceae</i>
<i>Crataegus monogyna</i>	<i>Rosaceae</i>
<i>Prunus spinosa</i>	<i>Rosaceae</i>
<i>Rosa canina</i>	<i>Rosaceae</i>

- Estrato herbáceo: Se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Especies, familias y abundancia del estrato herbáceo.

Especie	Familia
<i>Centaurea montana</i>	<i>Asteraceae</i>
<i>Scorzonera angustifolia</i>	<i>Asteraceae</i>
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	<i>Brassicaceae</i>
<i>Coronilla minima</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Muscari comosum</i>	<i>Liliaceae</i>
<i>Orchis morio champagne oxi</i>	<i>Orchidaceae</i>
<i>Ophrys lutea</i>	<i>Orchidaceae</i>
<i>Ophrys tenthredinifera</i>	<i>Orchidaceae</i>
<i>Bromus rubens</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Hordeum murinum</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Koeleria vallesiana</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Sanguisorba minor</i>	<i>Rosaceae</i>
<i>Veronica tenuifolia</i>	<i>Scrophulariaceae</i>

6. Material y métodos

6.1. Estudio climático

Para la realización del estudio climático se utilizaron datos procedentes de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), de las estaciones más cercanas a la zona de estudio, que en este caso se corresponden con Saldaña (2370), situada a escasos 8 km.

Conociendo que dichas estaciones tienen errores sistemáticos en las series de precipitación (Martínez de Azagra *et al.*, 1997), se llevo a cabo su detección y corrección por el método de las dobles acumulaciones, completando las series por regresión lineal, con la fórmula propuesta por Bartolomé (2012). Usando dicha fórmula se completó la serie de datos hasta el año 2014.

La serie de precipitaciones va desde el año 1952 al 2014, mientras que la serie de temperaturas abarca la serie de datos desde 1997 a 2014.

6.2. Estudio edafológico

6.2.1. Recogida de muestras

Se determinó en campo las distintas zonas que había en la cárcava (terreno desnudo y terreno con vegetación). Dentro del terreno desnudo se observó que había diferencia, entre el suelo de la parte baja de la cárcava y el de la parte alta. Se decidió en campo abrir una calicata en cada uno de esos lugares y tomar muestras alteradas e inalteradas de cada una de ellas.

Una vez abierta la calicata, se procede a la identificación de los horizontes, en este caso, no hay horizontes definidos, por lo que la muestra recogida engloba todo el suelo.

Las muestras alteradas se llevaron al Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (ITAGRA) para su análisis detallado, donde analizaron la textura, contenido en nutrientes y los parámetros físico-químicos más importantes.

A continuación en la Figura 6.1, se puede ver la recogida de muestras en campo.



Figura 6.1. Toma de muestra alterada (izda) e inalterada mediante cilindro de muestreo (dcha).

En la Figura 6.2, se observa uno de los informes de resultados remitidos por el ITAGRA, para una de las muestras alteradas que enviamos para su análisis.



* 150324 *

INFORME DE RESULTADOS

Cliente : Juan José Arribas García NIF : 71942933 Z Domicilio : C/ Pablo Picasso, 8 6ºE Población : 34200 Venta de Baños (PALENCIA)	Núm.Boletín: 15107 Reg. Salida: 5425 Nº Muestra: 150324 Registro muestra : 04/03/2015 Inicio análisis : 09/03/2015 Finalización análisis : 28/03/2015
Muestra de : Suelo	Referencia : Abajo

Nombre Determinación	Resultado	Com.	Método
pH (1:2,5)	8.25 ±0.14 .	[1]	Potenciometría PNT-S-01
Conductividad	0.51 mS/cm		Conduct. (1:2,5) PNT-S- 02
Elementos gruesos	29.56 g/100g		Tamiz 2 mm
Arena fina	14.56 g/100g		Tamiz 100 µm
Arena USDA	26.16 g/100g		Densímetro Bouyoucos
Limo USDA	24.28 g/100g		Densímetro Bouyoucos
Arcilla USDA	49.56 g/100g		Densímetro Bouyoucos
Materia orgánica oxidable	< 0.23 g/100g		Volumetría redox. PNT-S-05
Carbonatos	15.7 ±2.2 g CaCO3/100 g		Bernard. PNT-S-03
Caliza activa	2.3 g/100g		Bernard
Fósforo asimilable	< 4.0 mg/kg		Olsen. PNT-S-04
Potasio asimilable	85 mg/kg		Emisión atómica. PNT-S-07
Calcio asimilable	42.9 meq/100g		Absorción atómica. PNT-S-06
Magnesio asimilable	1.50 meq/100g		Absorción atómica. PNT-S-06
Sodio asimilable	0.07 meq/100g		Emisión atómica. PNT-S-07
Nitrógeno total	0.06 g/100g		Kjeldahl modificado

[1]: La determinación de pH se ha realizado a 21.5° C

OBSERVACIONES: Los resultados están expresados sobre suelo seco al aire

La muestra fue facilitada por el propio cliente. El análisis sólo da fe de la muestra recibida.
 Este boletín no se puede reproducir parcialmente sin la aprobación por escrito de la entidad emisora.

Emitido por: Laboratorio
 PALENCIA, 26 de Marzo de 2015

Figura 6.2. Informe de resultados de una muestra alterada emitido por ITAGRA.

Alumno: Juan José Arribas García
 UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
 Titulación de: Máster en Ingeniería de Montes

6.2.2. Características físicas y químicas del suelo

Con los resultados obtenidos del análisis de las muestras de suelo de ITAGRA, se han determinado las características físicas y químicas que permiten la correcta caracterización, siguiendo los criterios marcados por USDA (2003).

6.2.2.1. Determinación de la densidad aparente del suelo

Para ello se utilizó el método de los cilindros que se describe a continuación:

La muestra de la que queremos hallar su densidad se toma en campo, donde introducimos con ayuda de un martillo un cilindro de dimensiones conocidas en el horizonte del cual queremos conocer su densidad. Hemos de intentar que la muestra no se deforme y que el cilindro quede completamente lleno. (Figura 6.3).



Figura 6.3. Introducción del cilindro en el terreno (izda). Extracción del cilindro con muestra (dcha).

Posteriormente y en laboratorio la muestra se mete en la estufa a 100 °C durante 24 horas para que pierda la humedad. Al sacarla de la estufa se pesa, descontando el peso del cilindro, que es conocido, al igual que el volumen, como tenemos masa y volumen ya se puede determinar la densidad ($\text{densidad} = \text{masa} / \text{volumen}$). Este procedimiento se puede observar en la Figura 6.4.



Figura 6.4. Procedimiento de laboratorio para la determinación de la densidad aparente. a) Pesado de muestras en balanza; b) Secado de las muestras en estufa; c) Muestras inalteradas tras todo el proceso.

6.3. Caracterización hidrológica de la cuenca

Para poder realizar las mediciones necesarias y poder caracterizar cada uno de los factores de la cuenca, se trazó su divisoria topográfica con la cartografía obtenida a través del Modelo Digital del Terreno (MDT) (IGN, 2011). Por otra parte, la divisoria de escorrentía directa se ha obtenido mediante el uso de un GPS de precisión centimétrica, modelo Leica.

6.3.1. Delimitación de la divisoria de escorrentía directa

Para la delimitación de la divisoria se usó GPS de precisión centimétrica Leica. Una vez en campo, se decidió la sección de cierre de la zona de estudio, y se marcó con un clavo, para poder volver exactamente a ese punto en futuras mediciones. Señalada la sección de cierre, se recorrió a pie el contorno de la cárcava tomando puntos aproximadamente cada medio metro hasta llegar de nuevo al punto de inicio y cerrar el perímetro de escorrentía directa. En la Figura 6.5, se muestra la toma de puntos con este GPS.



Figura 6.5. Toma de puntos mediante GPS, en la divisoria de escorrentía directa.

6.3.2. Variación de la superficie y perímetro de la cuenca de estudio

Para poder conocer la variación de superficie y perímetro se realizaron dos mediciones, la primera en Noviembre de 2014 y la final que se realizó en Julio de 2015. Una vez tomados todos los puntos de la divisoria siguiendo la metodología del apartado anterior, ya en gabinete y mediante el programa AutoCAD Map 3D 2014, se traza la divisoria de escorrentía directa (uniendo todos los puntos tomados) y se calcula la superficie y el perímetro. Posteriormente con ArcMap 10 se transforma el archivo generado en AutoCAD para poder trabajar con ArcMap y poder poner la divisoria sobre la ortofotografía del lugar y elaborar los mapas necesarios, así mismo se vuelve a calcular tanto la superficie, como el perímetro para comprobar que en los dos programas utilizados se obtiene el mismo resultado.

6.3.3. Parámetros físicos de la cuenca vertiente

Se utilizó la metodología propuesta por Martínez de Azagra y Navarro (1996) y Navarro (2009). Los parámetros que se determinan son los siguientes:

- Superficie de la cuenca
- Longitud de la cuenca
- Índice de forma

- Índice de compacidad o *Gravellius*
- Relación de elongación
- Curva hipsométrica
- Curva de frecuencias
- Altura media
- Amplitud de relieve altitud media
- Rectángulo equivalente
- Relación de relieve
- Índice de pendiente relativo y pendiente media de la cuenca
- Coeficiente de masividad de *Martonne*
- Coeficiente orográfico de *Fournier*
- Factor LxS MUSLE

6.3.4. Parámetros físicos de la red de drenaje

Se utilizó la metodología propuesta por Martínez de Azagra y Navarro (1996) y Navarro (2009). Los parámetros que se determinan son los siguientes:

- Longitud del cauce principal
- Clasificación de la red de drenaje (según *Horton* y *Strahler*)
- Pendiente media del cauce principal
- Tiempo de concentración
- Densidad de drenaje
- Canal de alimentación, distancia de escorrentía y alejamiento medio
- Coeficiente de torrencialidad
- Frecuencia de cauces y radio de bifurcación
- Perfil longitudinal del cauce principal

A la hora de definir la red de drenaje ante la gran multitud de cauces que se podrían considerar, solamente se han tenido en cuenta aquellos claramente definidos ignorando cursos de agua débiles y pequeños regueros, que en este tipo de cuencas son muy abundantes.

6.4. Estimación de la erosión

6.4.1. Experiencias previas

En primer lugar se evaluaron los métodos tradicionales de medida de la erosión, como son los clavos y chapas. En una pista forestal se montaron secciones transversales de clavos y chapas, con ayuda de una cinta métrica, colocando clavos y chapas cada 50 centímetros, alternando clavo-chapa. Se instalaron varias secciones transversales (suelo desnudo con pendiente elevada, suelo desnudo con baja pendiente y suelo bajo arbolado) en las cárcavas asociadas a la pista forestal de “Los Cornones” (Saldaña), con la finalidad de poder comparar los resultados obtenidos en cada lugar. En la Figura 6.6, se puede ver como se instalaron estas secciones en la pista forestal.



Figura 6.6. Secciones transversales de clavos y chapas para medir erosión situadas en cárcavas asociadas a una pista forestal. a) clavos y chapas introducidas en el suelo. b) Chapa enrasada con el suelo. c) Vista de una sección completa.

Una vez colocadas las secciones, se pasaría a su medida en un periodo de 6 meses y de un año con objeto de observar el rebajamiento del terreno producido en ese periodo. En

una visita de control, que se realizó escasamente un mes después de la colocación de estas secciones se observó como la totalidad de clavos y chapas habían sido sustraídos, y por lo tanto se imposibilitaba cualquier tipo de medición posterior.

Ante este problema y dado que era imposible continuar con la evaluación mediante clavos y chapas, se decidió el empleo de otros métodos, en los que no hubiera que dejar material en campo y cuya precisión en la determinación de la erosión fuera de exactitud similar a la que se obtiene con los métodos anteriores. Uno de los que se desechó, fue la medida de erosión mediante secciones transversales, similares a las anteriores midiendo cada medio metro, pero en vez de dejar clavos en el terreno únicamente se dejarían clavos en las cunetas de la pista para sujetar la cintra métrica y la medición de los puntos se tomarían mediante el empleo de un GPS de precisión centimétrica. En la Figura 6.7, se muestra la realización de este tipo de medición.



Figura 6.7. Medición de las secciones transversales mediante el GPS de precisión centimétrica.

El problema que presenta este método y por lo que se rechazó, es que para estudios como este, con un periodo de tiempo inferior a un año, la rebaja que se iba a producir de terreno, es inferior al error del instrumento, es decir, el terreno se iba a rebajar menos de lo que es capaz de medir este instrumento, por lo tanto este método se desestimó.

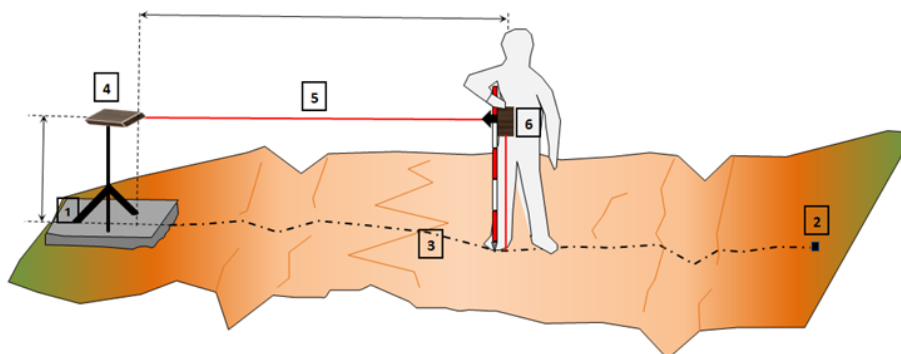
Llegados a este punto, se evaluaron instrumentos topográficos de precisión milimétrica, destacando por su relación calidad-precio el distanciómetro láser, tras una búsqueda por el mercado del modelo más adecuado, elegimos el modelo Leica DistoTM D510, debido a que este modelo permite realizar mediciones de perfil en altura con bastante facilidad además de la buena precisión que tiene el instrumento y

sus escasas dimensiones que le hacen adecuado para llevar al campo. En la Figura 6.8, se muestra la imagen del instrumento.



Figura 6.8. Distanciómetro Leica Disto™ D510.

Una vez conocido y analizado el instrumento se realizó un intenso trabajo de gabinete evaluando cual era la mejor forma de medir erosión mediante su empleo. Algunas de las opciones que se pensaron para el uso del distanciómetro fueron las siguientes: empleo del instrumento unido a una pértiga, el cual presentaba el problema de la necesidad de usar dos distanciómetros, uno de ellos que nos marcara la horizontal de referencia ($h=0$), desde la que se debía medir con el otro distanciómetro al suelo. Por este problema, unido a la necesidad de realizar una plataforma base para el replanteo de secciones hizo que este método se desestimara. En la Figura 6.9 se muestra el prototipo de este método.



- ① Plataforma base para replanteo de sección cada año.
- ② Estaca de referencia para replanteo de sección cada año
- ③ Sección replanteada con cinta métrica o cordón
- ④ Distanciómetro láser que nos da la distancia al punto de medida (precisión ± 0.5 mm)
- ⑤ Línea láser
- ⑥ Distanciómetro láser que nos ofrece el rebajamiento cada año de la sección, barriendo tantos puntos como queramos

Figura 6.9. Prototipo del perfilador laser. Autor: Joaquín Navarro.

Otra opción que se valoró, fue unir el distanciómetro a un carro por el que se pudiera deslizar. Este carro llevaría una cinta métrica para poder tomar medidas a la distancia que nos interesara y estaría sujeto por dos jalones extensibles y un nivel para poder nivelarla en el terreno y realizar las medidas en horizontal. El método solo requería dejar en campo dos clavos que señalarían donde se apoyaron los jalones en las anteriores mediciones. Se rechazó debido a la complejidad de montar todo el sistema de jalones y el carro deslizable. En la Figura 6.10, se puede ver el prototipo de este método.

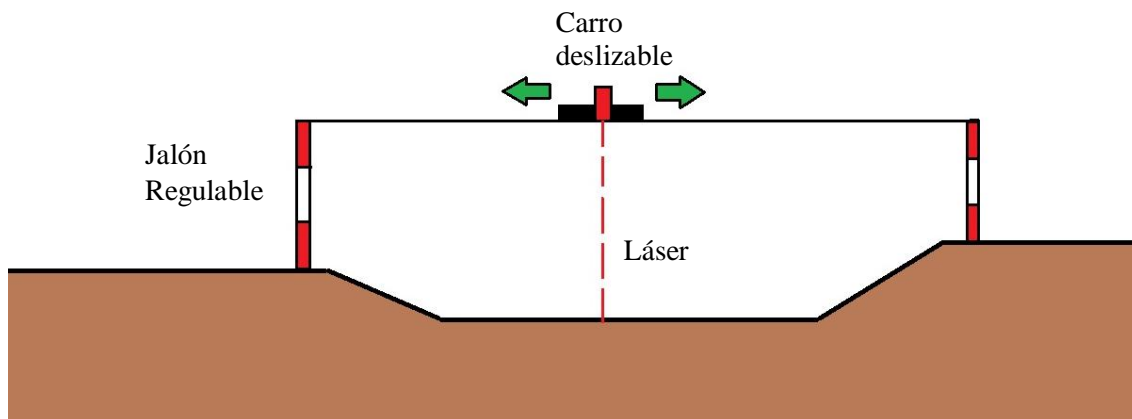


Figura 6.10. Prototipo de jalones con el distanciómetro acoplado a un carro deslizable.

Finalmente se valoró el uso del instrumento, apoyado en un trípode, que permitiera quedar fijo en rotación lateral y solo moverse de arriba a abajo para una vez estacionado el distanciómetro y con unos clavos de referencia siempre medir sobre la misma sección. Se decidió realizar una prueba piloto de este método de medida, para comprobar la fiabilidad del método y los posibles problemas asociados al levantamiento de las secciones. Si esta prueba resultaba satisfactoria sería el método escogido para llevar a campo y ejecutar las mediciones.

Esta prueba se realizó en unas laderas situadas en el municipio de Tariego de Cerrato (Palencia), en ella se decidió cómo debían ser las secciones a realizar en campo y qué material era necesario para realizarlas. En este primer contacto con el distanciómetro láser, se determinó que para el establecimiento de cada una de las secciones, se necesitan tres clavos, uno de ellos para señalar el punto de estación del trípode con el instrumento y poder volver a estacionar en él, tantas veces como se necesite, otro que determina el 0 (referencia), es decir, la referencia de altura que va a usar el distanciómetro para calcular el resto de alturas y el último clavo es el que nos marca el

final de la sección. Entre el clavo que nos marca el 0 y el que nos marca el fin de la sección se extiende una cinta métrica, con objeto de ayudar a la toma de medidas cada cierta distancia.

También esta prueba nos ayudo a hacer un estadillo de campo (Figura 6.12), para anotar las medidas tomadas y facilitar el procesado de datos en gabinete.

En la Figura 6.11, se muestran imágenes de la prueba piloto.

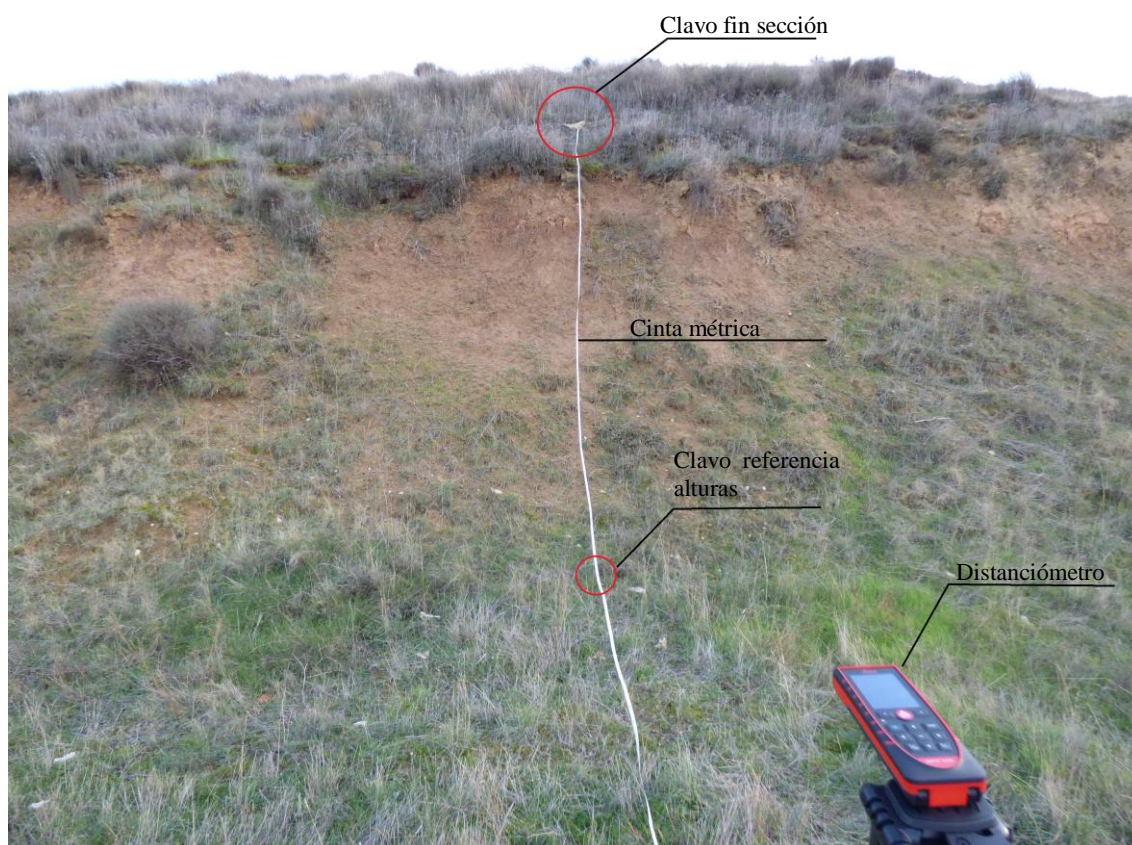


Figura 6.11. Croquis sección piloto en Tariego de Cerrato (Palencia).

Municipio: [Tariego de Cerrato](#)

Fecha: 9/12/2014

Cárcava nº: 1

Perfil nº: 1

Puntos del perfil: 14

Número de punto	Distancia aprox. Cinta métrica	Distancia horizontal (d)	Diferencia altura al Pto Ref. (h)
REF	0		0
1	1	1	0,3
2	1,2	1,27	0,5
3	1,4	1,45	0,8
4	1,6	1,37	1,3

Figura 6.12. Estadillo de campo para la anotación de datos.

Una vez tomados los datos en campo, ya en gabinete se procesan mediante el software Microsoft Excel 2007, donde los puntos se preparan para poder ser introducidos en el programa AutoCAD Map 3D 2014, donde se representa el perfil de la ladera. En la Figura 6.13 se puede ver la representación de uno de los perfiles de la prueba piloto.

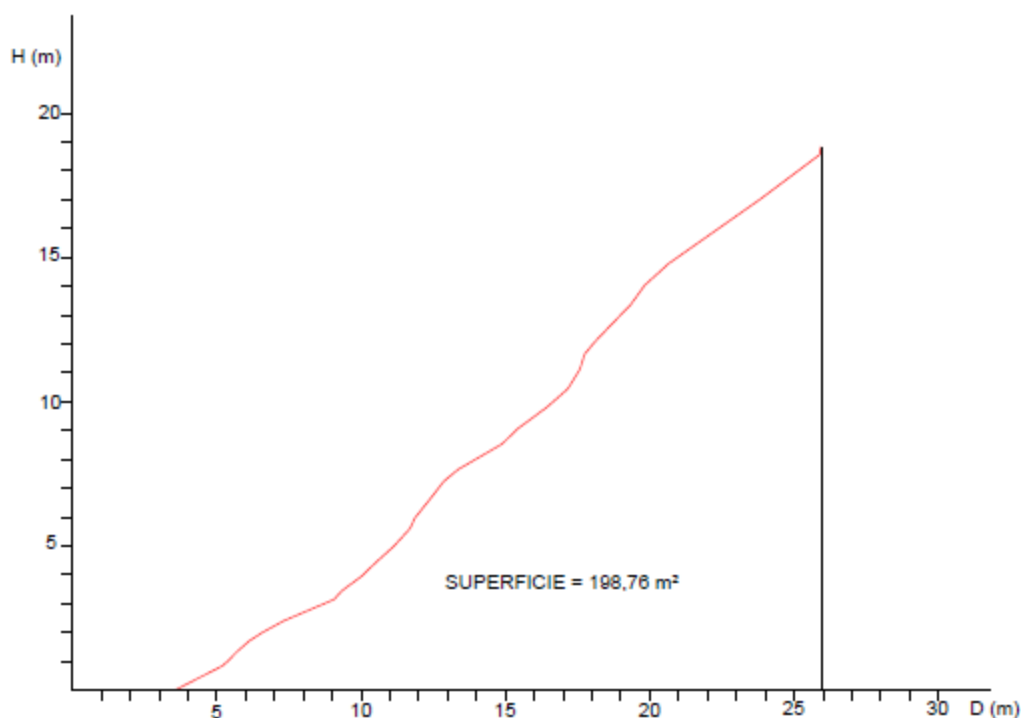


Figura 6.13. Perfil obtenido mediante puntos del distanciómetro láser de una ladera en Tariego de Cerrato (Palencia).

Una vez analizados los resultados obtenidos y contrastados la calidad de estos, se acepta este método como válido, no solo en cuanto a resultados, sino también en cuanto a rendimiento, puesto que las secciones entre estación, replanteo y medición se tarda una media de 45 minutos, dependiendo de cómo sea la longitud de la sección.

6.4.2. Determinación de la erosión en la zona de estudio

En las secciones de control establecidas en la zona de estudio, se realizarán dos mediciones, una el día en el que se instalen y otra pasados alrededor de 6 meses, los perfiles obtenidos se representaran en diferentes gráficos para de esa manera poder comparar el perfil de las secciones en las dos mediciones y observar los fenómenos que hayan ocurrido en las secciones durante ese periodo de tiempo. Debido a las fuertes tormentas ocurridas durante la primavera, se decidió realizar una tercera medición para poder determinar la erosión que produjeron; por lo que finalmente se han realizado tres

mediciones (la primera en la instalación de las secciones, la segunda transcurridos 6 meses y la tercera un mes después de la segunda después de las tormentas de esta primavera). Si tan importante es la realización de las medidas para poder realizar la comparación de los perfiles obtenidos, es también muy importante saber la precipitación que ha originado esos sucesos, por tanto se decidió la instalación de un pequeño pluviómetro artesanal en la zona de estudio.

6.4.2.1. Instalación del pluviómetro

En campo, se decidió el lugar más adecuado para la instalación del pluviómetro totalizador siguiendo lo expuesto por Navarro (2003). Se determinó situarlo en la parte baja de la zona de estudio y sin vegetación que pudiera alterar los resultados. Los materiales que se emplearon para la construcción de este pluviómetro, son de escaso valor y reciclados. En la Figura 6.14, se puede ver el proceso de montaje del pluviómetro.



Figura 6.14. Instalación del pluviómetro. a) Enganche del captador de agua, manguera y depósito de recogida de agua. b) Amarre del captador a la varilla de sujeción. c) Deposito apoyado en el suelo. d) Pluviómetro finalizado.

El pluviómetro se montó el mismo día en el que se establecieron las secciones de medida, y se decidió realizar tres recogidas de agua, una tres meses después de su instalación en una visita de control que se realizó a la zona, la segunda el día de la segunda medición de las secciones establecidas y la tercera en la última medición después de las tormentas de la primavera. El pluviómetro totalizador se ha dejado instalado en la zona de estudio, para poder realizar futuras mediciones y recogidas de agua. En la Figura 6.15, se puede ver el momento de la recogida del agua del pluviómetro.



Figura 6.15. Vaciado del depósito en recipiente de medida (izda). Medición de la cantidad de agua recogida (dcha).

Para poder determinar la cantidad de agua recogida por el pluviómetro, es necesario medir el diámetro medio del recipiente captador del agua, para nuestro pluviómetro el diámetro es de 10,3 cm. Por lo tanto a partir del diámetro calculamos el área de captación de precipitación por la fórmula del área de una circunferencia.

$$\text{Área de captación} = \pi \times r^2 = \pi \times (0,0515)^2 = 0,008332 \text{ m}^2.$$

Una vez calculado el área de captación de precipitación, mediante la probeta que se observa en la figura anterior, calculamos los milímetros de agua recogidos (625 ml.) y calculamos los l/m^2 de la siguiente manera:

Total $l/m^2 = 0,625 / 0,008332 = 75,012 l/m^2$ en los primeros tres meses de recogida.
Para el resto de recogidas, la cantidad de agua se cálculo de la misma forma.

6.4.2.2. Instalación de la secciones de control

Una vez instalado el pluviómetro, en campo, se decidió dónde se iban a colocar las secciones de medición, y a su vez cuántas secciones se iban a realizar. Finalmente se instalaron 13 secciones de control, en diferentes zonas de la cárcava y de tal forma que esas 13 secciones abarcaran los lugares más representativos de la zona de estudio.

Para facilitar la identificación de los clavos en sucesivas medidas se señalaron con un espray de alta visibilidad y también se realizó un croquis identificativo, que se puede ver en la Figura 6.16

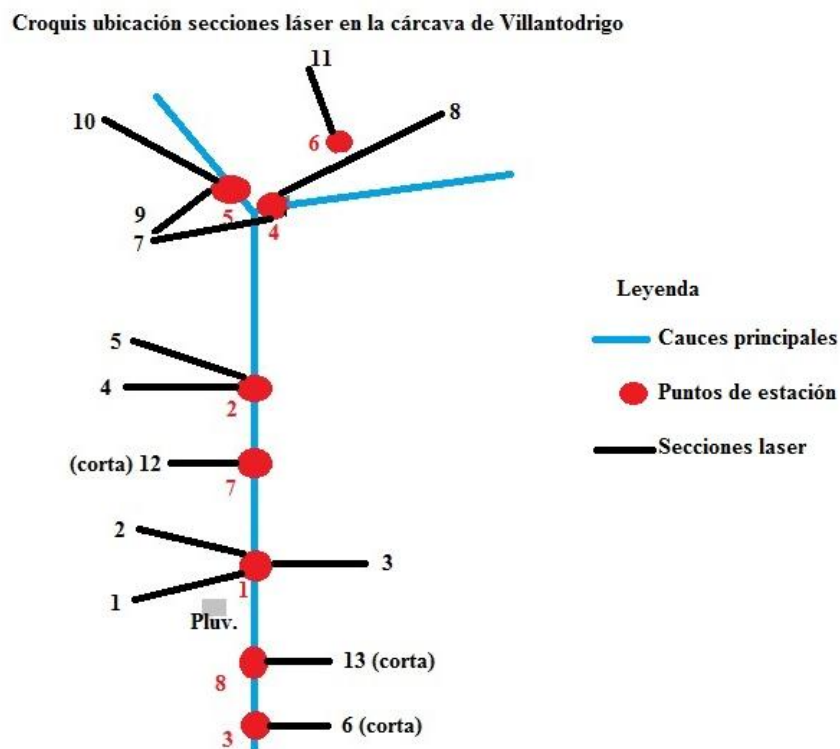


Figura 6.16 Croquis de la ubicación de las secciones de medida, de los puntos de estación y del pluviómetro.

Las secciones se establecieron como se determinó tras la prueba piloto, es decir, con la necesidad de tres clavos por sección, el primero de ellos que señala el lugar de estación del trípode, el segundo llamado referencia, que es para determinar la referencia que va a usar el instrumento para tomar el resto de alturas y un tercero para indicar el final de la

sección. En la Figura 6.17, se muestra una de las secciones montadas en la zona de estudio.



Figura 6.17. Croquis de una de las secciones establecidas en la zona de estudio.

6.4.2.3. Cálculo de las tasas de erosión

Con las medidas tomadas con el distanciómetro láser (distancia horizontal medida desde el instrumento, así como la diferencia de alturas respecto al clavo de referencia) para cada una de las secciones. Los datos tomados se agrupan y procesan en Microsoft Office Excel 2007 para su representación en AutoCAD Map 3D 2014, obteniendo para cada sección la representación de tres perfiles, uno por cada medición (Diciembre, Mayo y Junio) y pudiendo comparar dichos perfiles dentro de un mismo gráfico, la comparación se puede realizar debido a que se han usado puntos fijos medidos en cada una de las mediciones. Esa comparación permite hallar las áreas donde se ha producido erosión y sedimentación entre los perfiles que se han comparado. Para obtener los m^3 de suelo erosionado o sedimentado, esas superficies de erosión o sedimentación calculadas mediante AutoCAD Map 3D se multiplican por la anchura que representa cada sección de control, en campo, se decidió que la anchura fuera de 20 cm, puesto que en esos 20 cm se mantiene la uniformidad del terreno. Una vez obtenidos los m^3 , para obtener los kg se multiplican por la densidad aparente, distinguiendo diferentes densidades en función del suelo erosionado y sedimentado, es decir, el suelo erosionado tiene una

densidad superior al sedimentado (más esponjoso) y por eso en campo se tomaron muestras inalteradas para ambos casos siguiendo el método de los cilindros. De esta manera obtenemos los kg de suelo erosionado y los kg de suelo sedimentado, la diferencia entre ambos nos indica el suelo que se ha perdido, en caso de que la diferencia sea negativa es que ha habido ganancia de suelo. Esos kg de suelo erosionado o sedimentado, se multiplican por la longitud de la sección y por la anchura (0,20 m), para obtener su superficie. Finalmente dividimos los kg de suelo entre la superficie de la sección para llegar al resultado de pérdida o ganancia de suelo en kg/m^2 o bien transformarlo a t/ha.

7. Resultados

7.1. Variación de la superficie de la cárcava

Para poder conocer la variación que ha sufrido la superficie de la cárcava en el tiempo en el que se ha desarrollado el presente estudio, se realizaron dos mediciones empleando exactamente la misma metodología, una al principio del estudio (Noviembre 2014) y otra al final del trabajo (Julio 2015) con ayuda de un GPS de precisión centimétrica cuyos resultados se van a mostrar a continuación. En la Figura 7.1 se muestra la divisoria de escorrentía directa de la cárcava de estudio, obtenida mediante ArcMap 10.

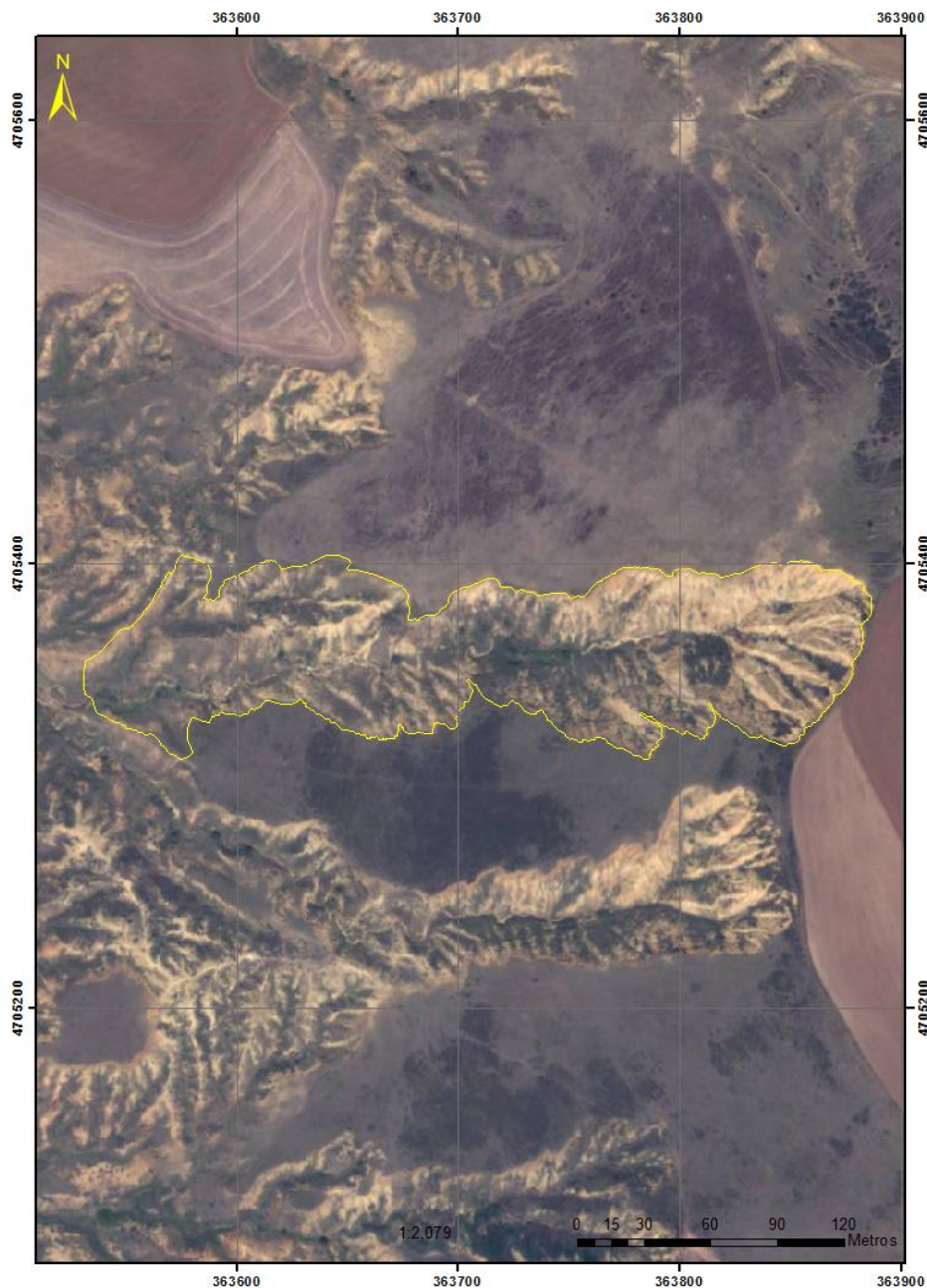


Figura 7.1. Divisoria de escorrentía directa tomada en Noviembre de 2014.

Una vez elaborada la divisoria, se calculó el área y el perímetro tanto con AutoCAD Map 3D 2014 como con ArcMap 10 obteniendo para ambos casos el mismo resultado que se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Datos correspondientes a la medida de Noviembre de 2014.

Mes/Año	Área (m ²)	Perímetro (m)
Noviembre/2014	22.510,18	1053,53

Una vez elaborada la divisoria correspondiente al mes de Noviembre, se pasa a realizar la correspondiente al mes de Julio del año siguiente y calcular sus parámetros correspondientes. La Figura 7.2 ilustra la divisoria correspondiente a esta medición.

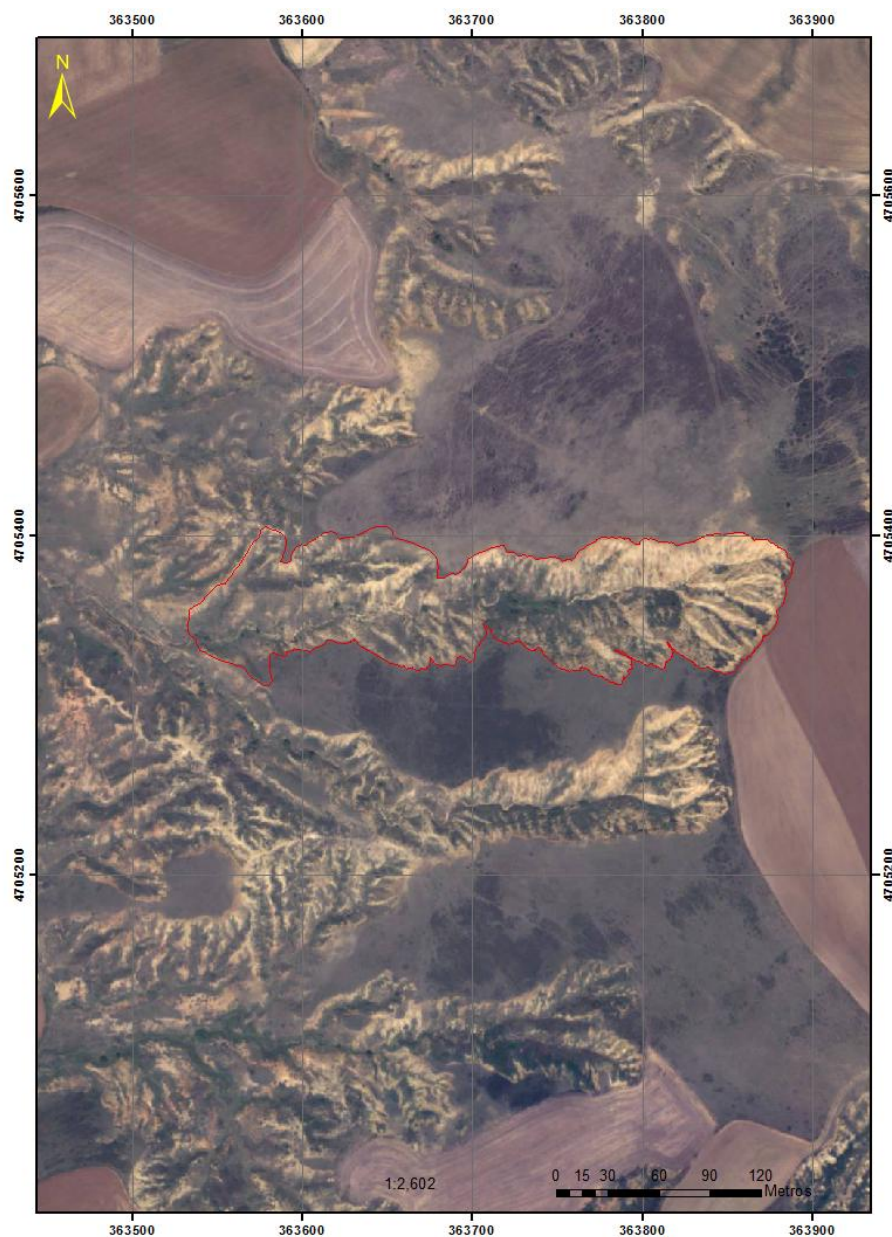


Figura 7.2. Divisoria de escorrentía directa tomada en Noviembre de 2014.

En la Tabla 7.2 aparecen detallados los parámetros correspondientes a esta medición.

Tabla 7.2. Datos correspondientes a la medida de Julio de 2015.

Mes/Año	Área (m ²)	Perímetro (m)
Julio/2015	22.713,92	1053,99

Una vez halladas las divisorias correspondientes a las dos mediciones, se comparan para ver cómo ha evolucionado la cárcava de estudio, esta comparación se puede observar en la Figura 7.3.



Figura 7.3. Comparación de las divisorias de Noviembre y Julio.

En la Figura 7.4 se amplía la zona de las divisorias con objeto de poder distinguir mejor los cambios que han ocurrido de una medición a otra.



Figura 7.4. Detalle de las divisorias correspondientes a la zona de estudio.

En la Tabla 7.3 se recogen los parámetros de ambas mediciones, así como las diferencias de área y perímetro entre ambas mediciones.

Tabla 7.3. Datos correspondientes a ambas mediciones y sus diferencias.

Mes/Año	Área (m ²)	Perímetro (m)
Noviembre/2014	22.510,18	1053,53
Julio/2015	22.713,92	1053,99
Diferencia	203,74	0,46

A la hora de expresar los resultados y poderlos comparar y discutir con otros trabajos, debemos expresarlos en las misma unidades, por lo tanto las tasas de variación tienen que ir expresados en m²/año y en m/año, para lo cual lo realizamos mediante una interpolación lineal, es decir, calculamos los días pasados entre las dos mediciones (250 días) y lo pasamos a un año. Una vez realizados los cálculos quedan los siguientes resultados:

- $\chi_{\text{Sup}} = 297,46 \text{ m}^2/\text{año}$.
- $\chi_{\text{Per}} = 0,67 \text{ m/año}$.

7.2. Tasas erosivas estimadas a través de las secciones de control

A la hora de estimar la erosión en la zona de estudio y como se ha comentado anteriormente se instalaron 13 secciones de control representativas de la cárcava que se midieron con la ayuda de un distanciómetro láser. Se realizaron tres mediciones, una en el momento de la instalación de las secciones, otra transcurrida aproximadamente seis

meses y una tercera después de las lluvias torrenciales de la pasada primavera, todas ellas se realizaron siguiendo la misma metodología, que ha sido creada para la realización de este trabajo. A continuación se muestran los perfiles representados de cada una de las secciones en cada medición, así como la comparación entre perfiles de los diferentes periodos de medida (periodo 1-2: Diciembre-Mayo; periodo 1-3: Diciembre-Junio y periodo 2-3: Mayo-Junio). Una vez mostrados los perfiles de las secciones se expresaran los cálculos de los mismos desglosados y finalmente la media de los mismos.

7.2.1. Sección de control 1

Para este perfil, solo se representan las medidas correspondientes a Diciembre y Junio (Periodo 1-3) (Figuras 7.5 y 7.6 respectivamente), debido a que en la medida de Mayo se cometió un error en la toma de datos que obliga a invalidar dicha medición.

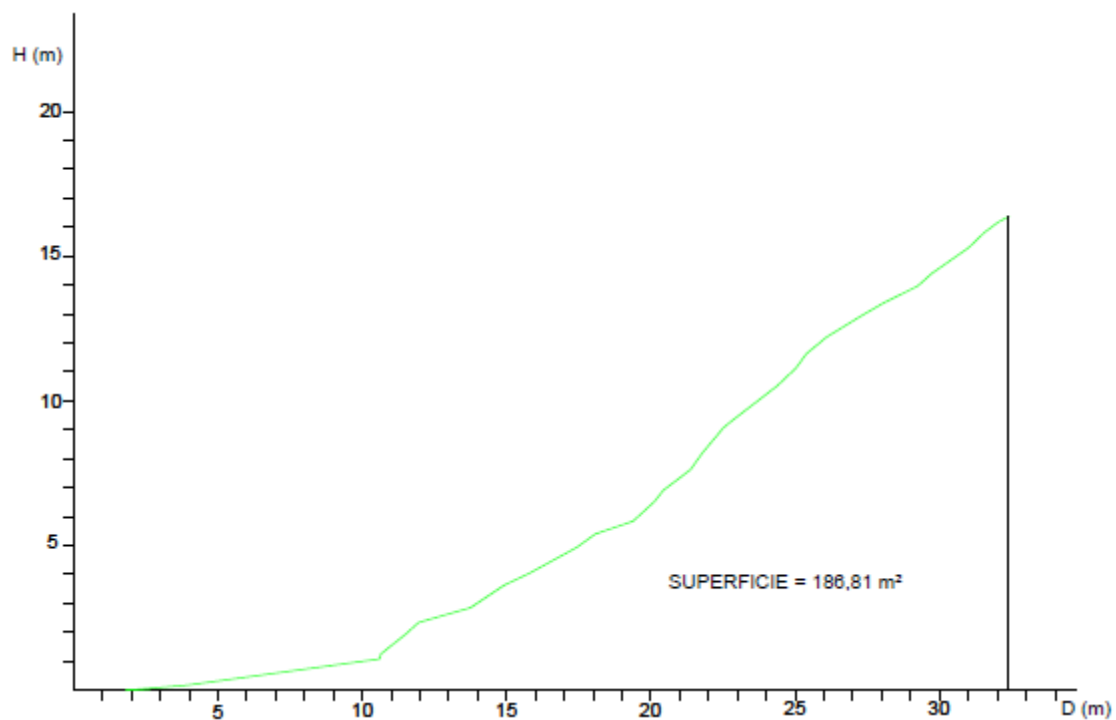


Figura 7.5. Perfil representado de la medida correspondiente a Diciembre 2014.

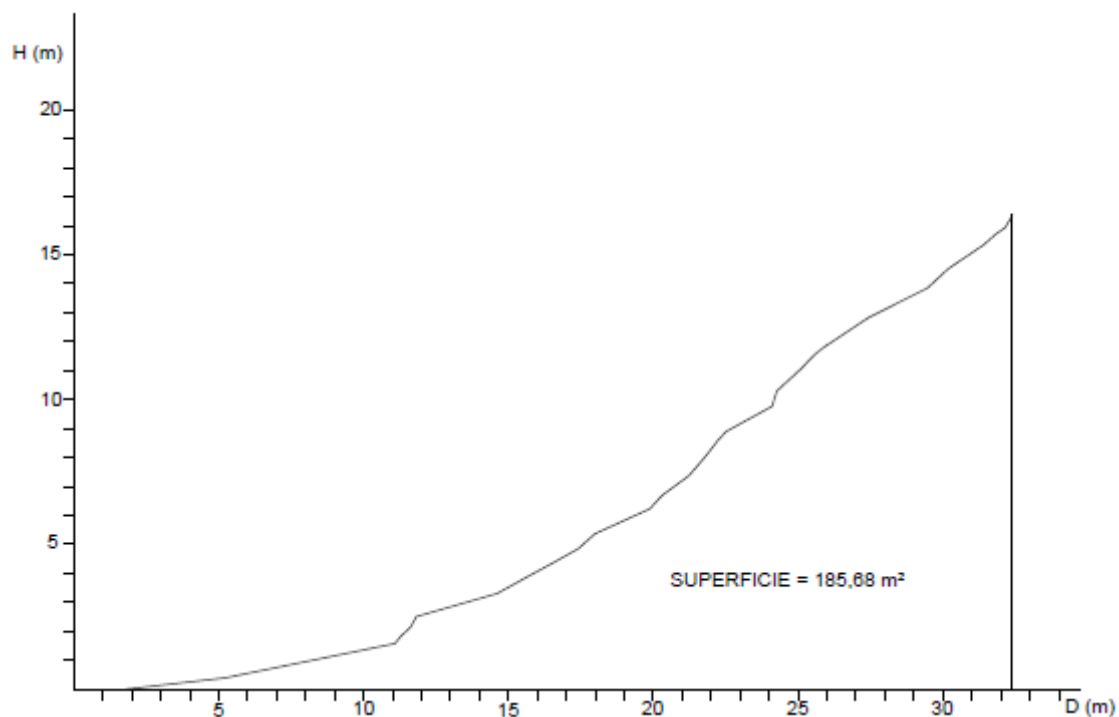


Figura 7.6. Perfil representado de la medida correspondiente a Junio 2015.

La comparación entre ambos perfiles se ilustra en la Figura 7.7.

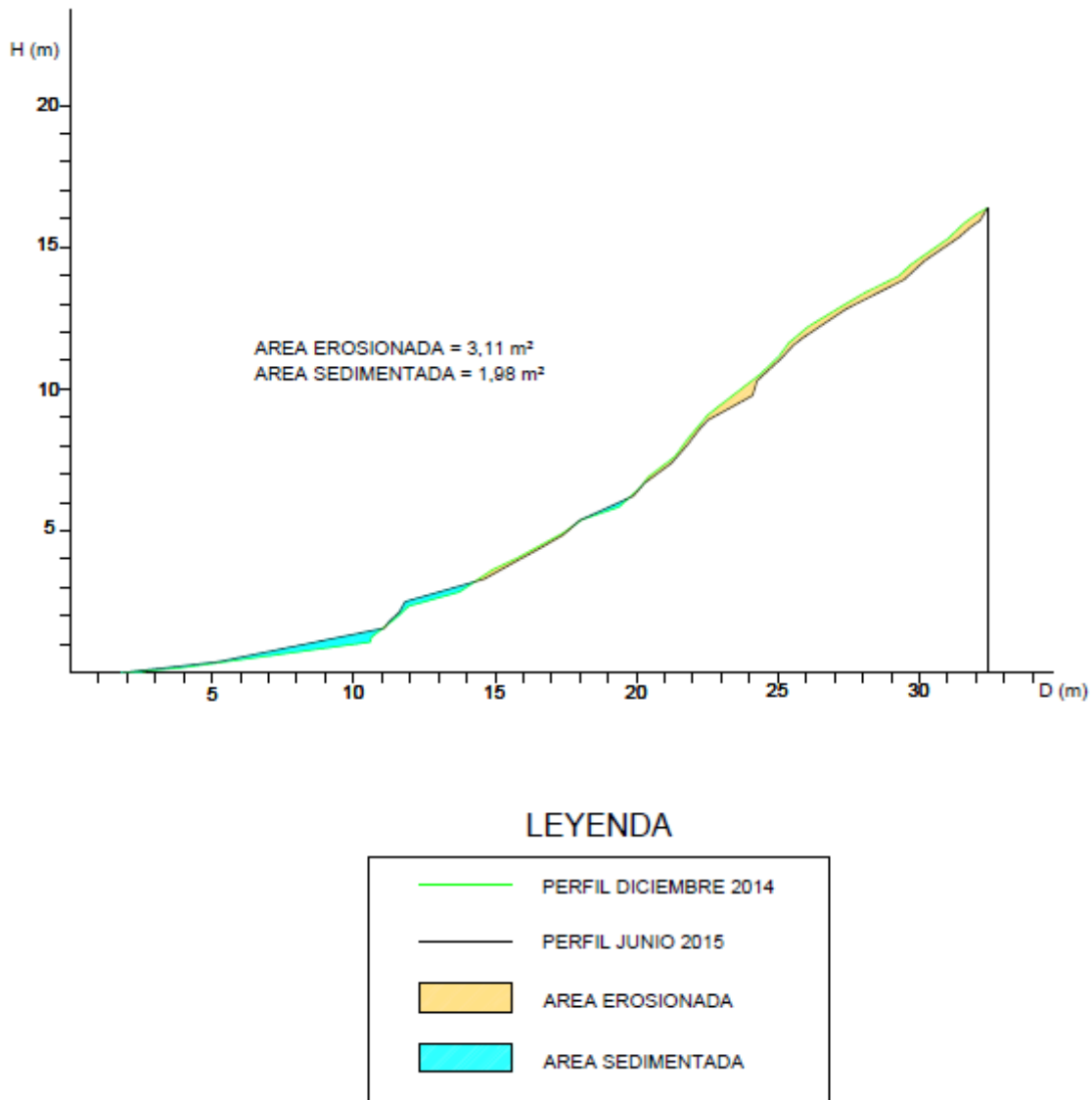


Figura 7.7. Comparación de perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y las áreas de erosión y sedimentación.

Los resultados para este perfil se muestran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Resultados para la sección de control 1.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-3	53,5	3.11	1023,81	1,98	588,32	71,20	712

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.2. Sección de control 2

Para esta sección se presentan los perfil obtenidos en Diciembre, Mayo y Junio (Figuras 7.8, 7.9 y 7.10 respectivamente) así como las comparaciones correspondientes al periodo 1-2, 1-3 y 2-3 (Figuras 7.11, 7.12 y 7.13).

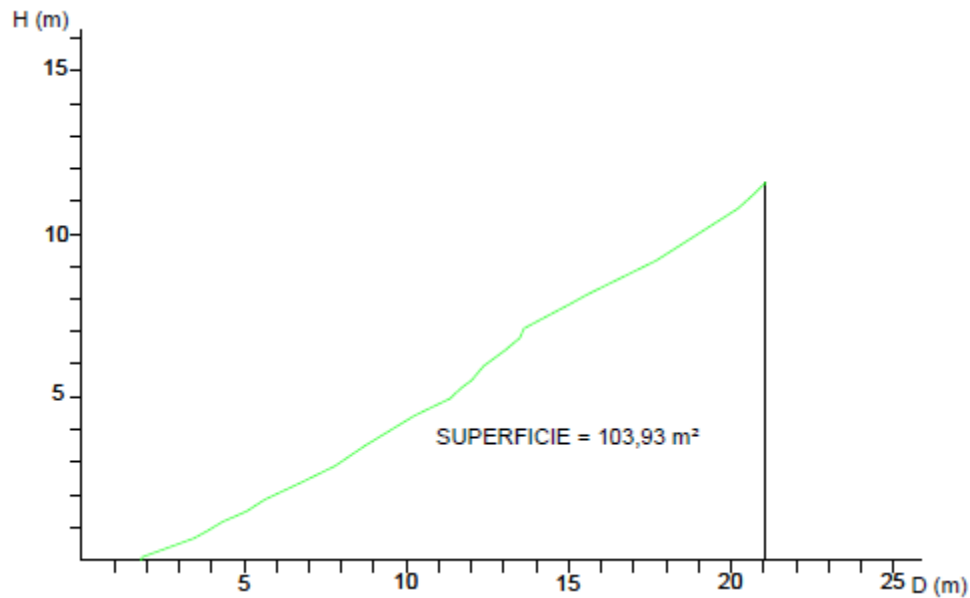


Figura 7.8. Perfil representado de la medida correspondiente a Diciembre de 2014.

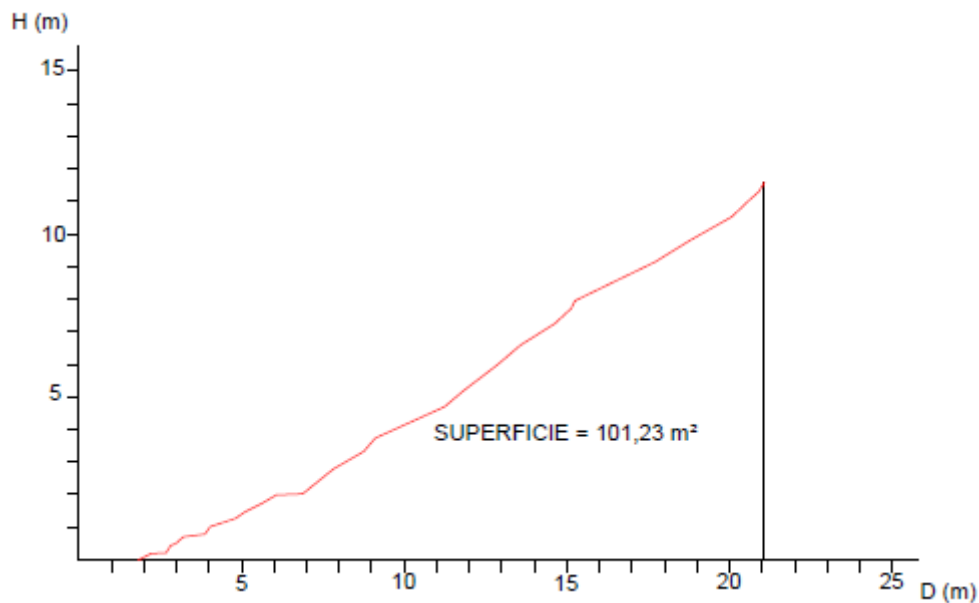


Figura 7.9. Perfil representado de la medida correspondiente a Mayo de 2015.

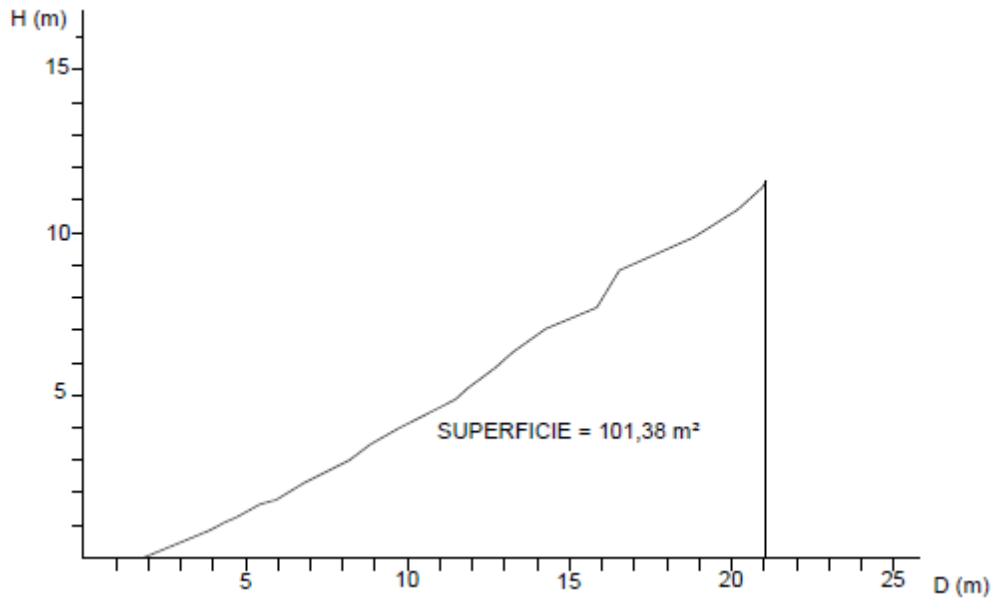
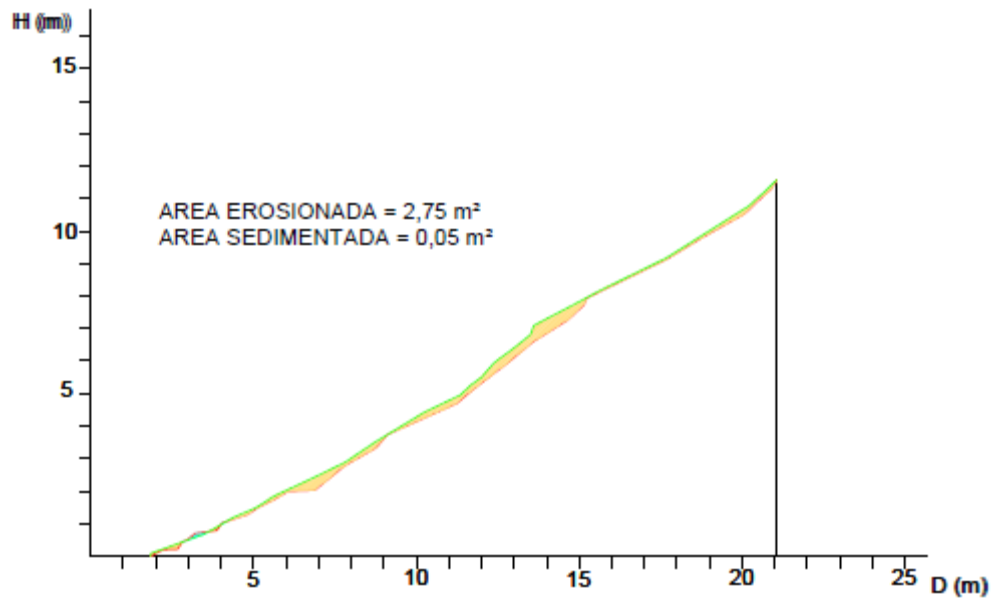


Figura 7.10. Perfil representado de la medida correspondiente a Junio de 2015.



LEYENDA

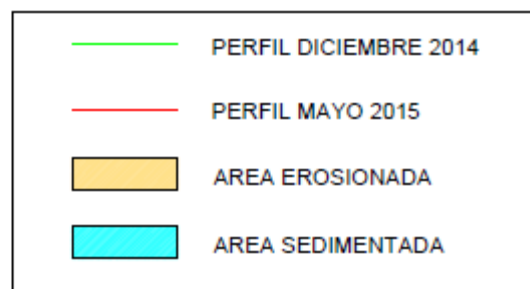


Figura 7.11. Comparación de perfiles entre las medidas de Diciembre y Mayo y las áreas de erosión y sedimentación.

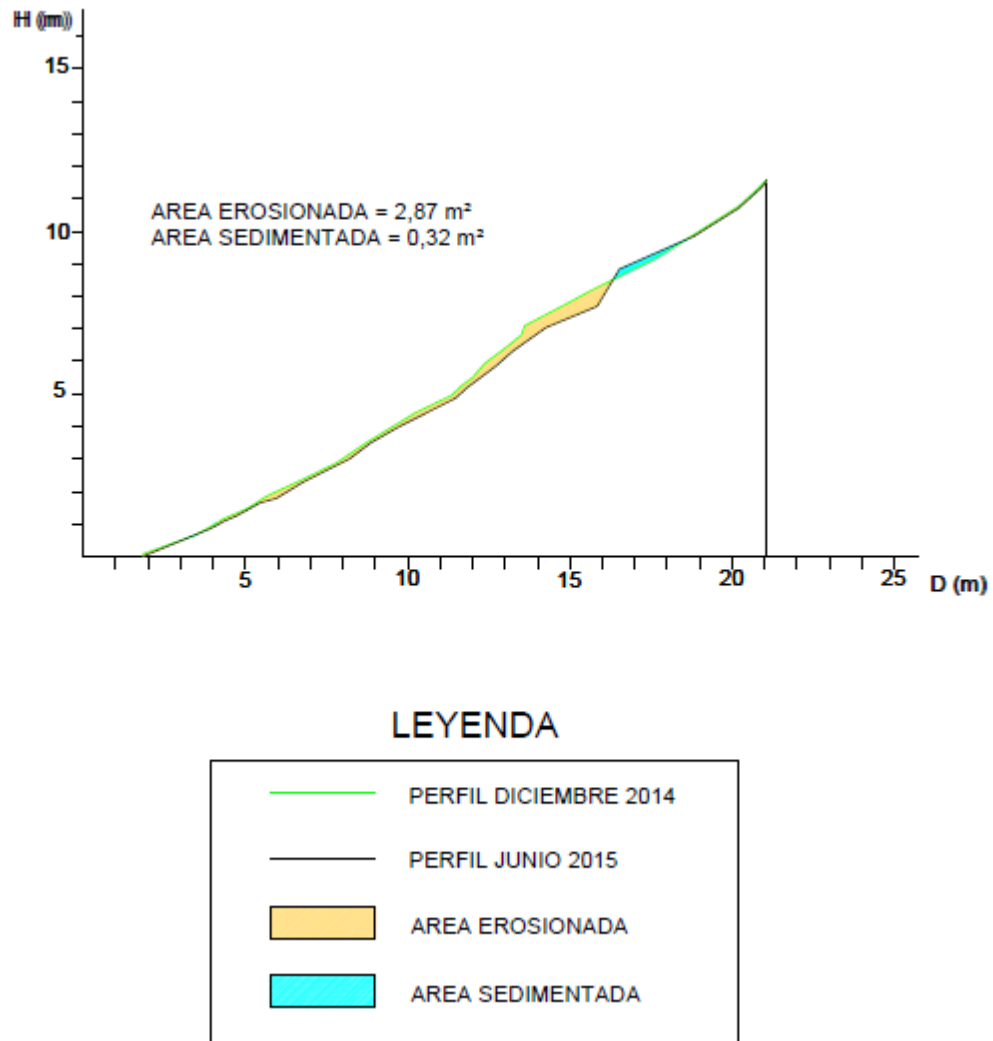


Figura 7.12. Comparación de perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y las áreas de erosión y sedimentación.

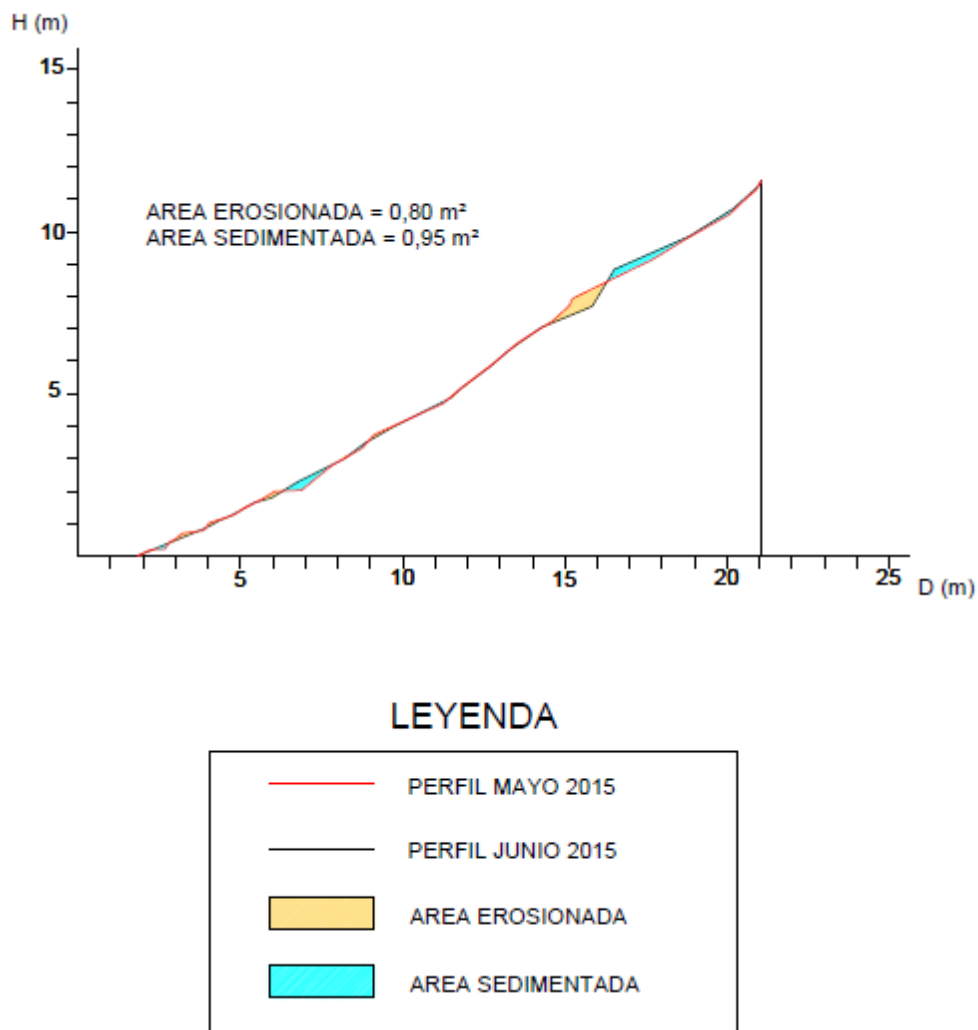


Figura 7.13. Comparación de perfiles entre las medidas de Mayo y Junio y las áreas de erosión y sedimentación.

Los resultados para este perfil se muestran en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Resultados para la sección de control 2.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	60,18	2,75	905,19	0,05	15,73	231,13	2311,3
1-3	60,18	2,87	944,1	0,32	95,23	220,77	2207,7
2-3	60,18	0,8	263,85	0,95	281,88	-4,68	-46,8

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo menos indica que no ha habido pérdida de suelo si no ganancia.

7.2.3. Sección de control 3

El caso de esta sección es particular, debido a que cuando se instaló estaba completamente desnuda y sin vegetación, lo que permitía su medición, pero cuando se paso a realizar la segunda medida de control, la vegetación la había cubierto entera, imposibilitando la medida con el distanciómetro láser, ya que con vegetación no se puede emplear.

La Figura 7.14 muestra el estado en el que se encontraba la sección de control en el momento de realizar la segunda medida.



Figura 7.14. Estado de la sección de control 3, en el momento de la segunda medida.

7.2.4. Sección de control 4

Para esta sección también se disponen de datos correspondientes a las 3 mediciones y cuya representación gráfica queda ilustrada a través de las Figuras 7.15, 7.16 y 7.17.

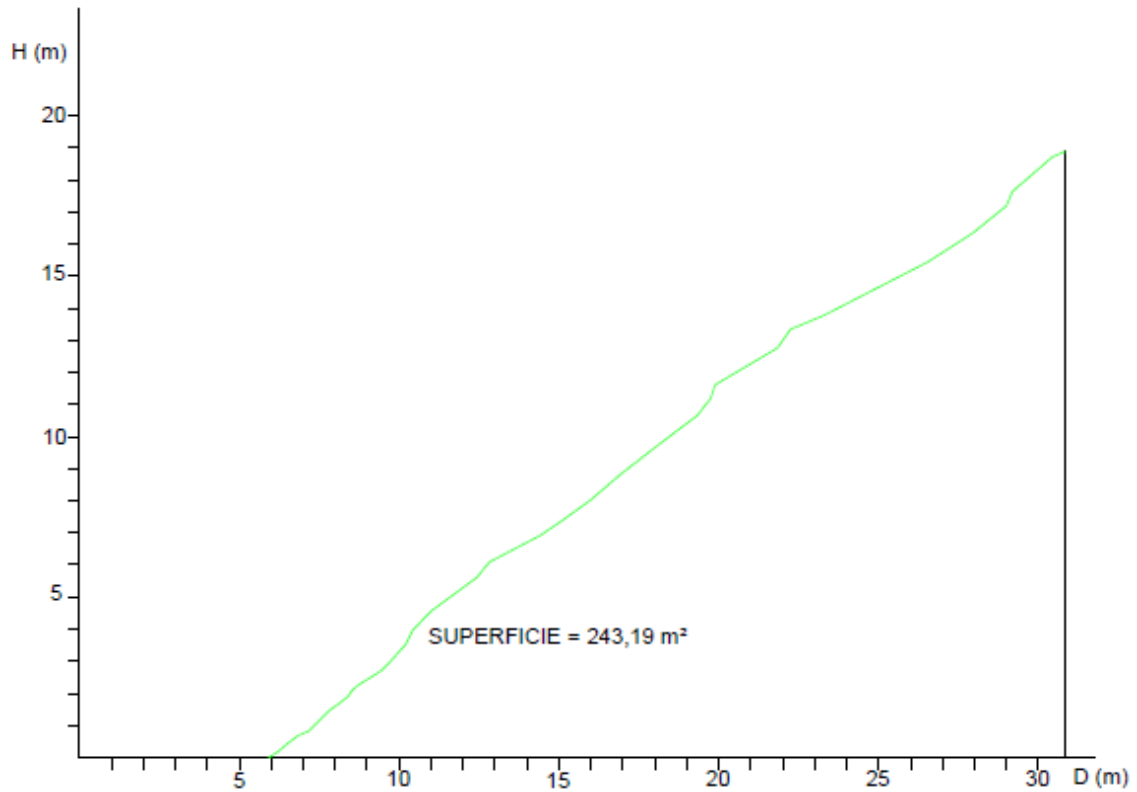


Figura 7.15. Perfil representado de la medida correspondiente a Diciembre de 2014.

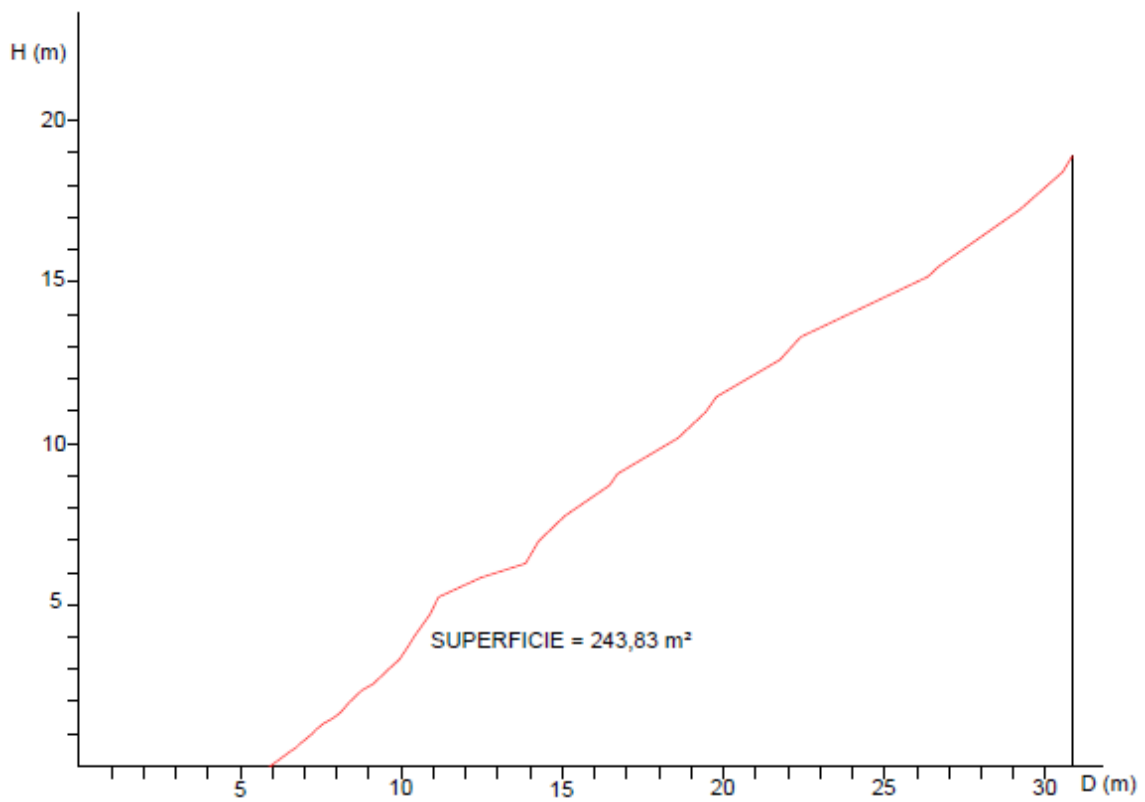


Figura 7.16. Perfil representado de la medida correspondiente a Mayo de 2015.

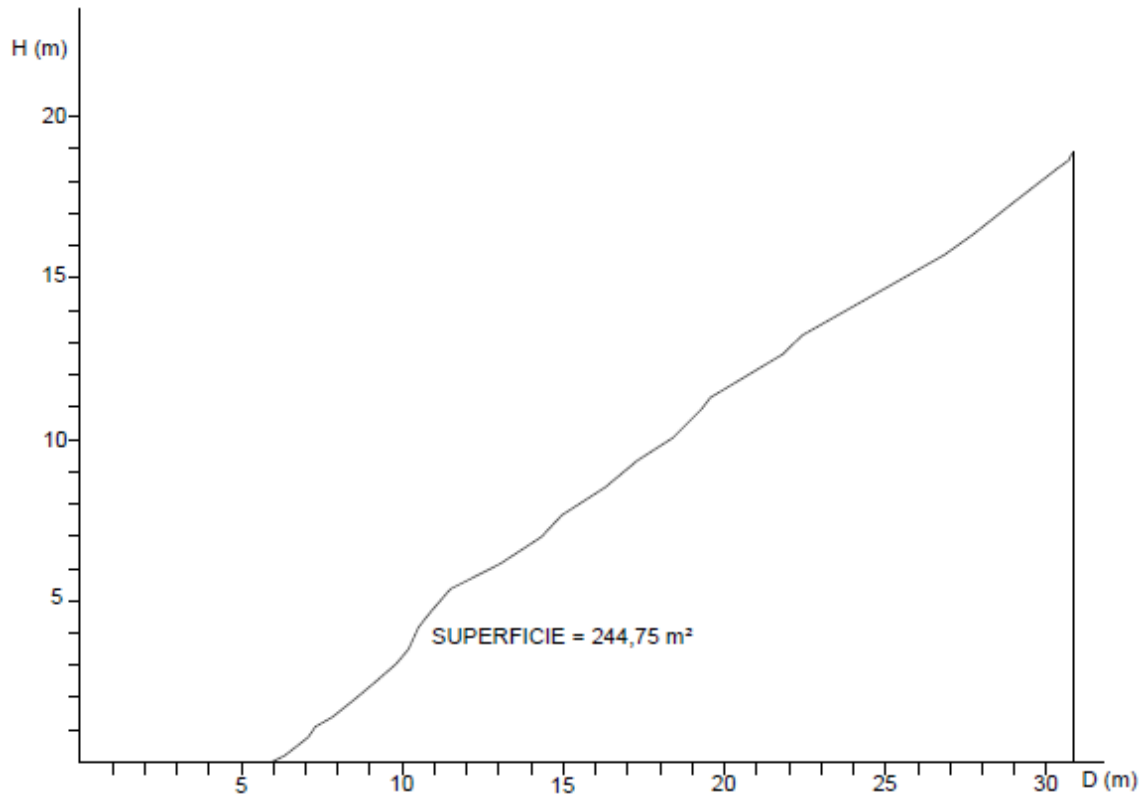


Figura 7.17. Perfil representado de la medida correspondiente a Junio de 2015.

A continuación se exponen la comparación de los perfiles entre los diferentes periodos de medida (Figuras 7.18, 7.19 y 7.20).

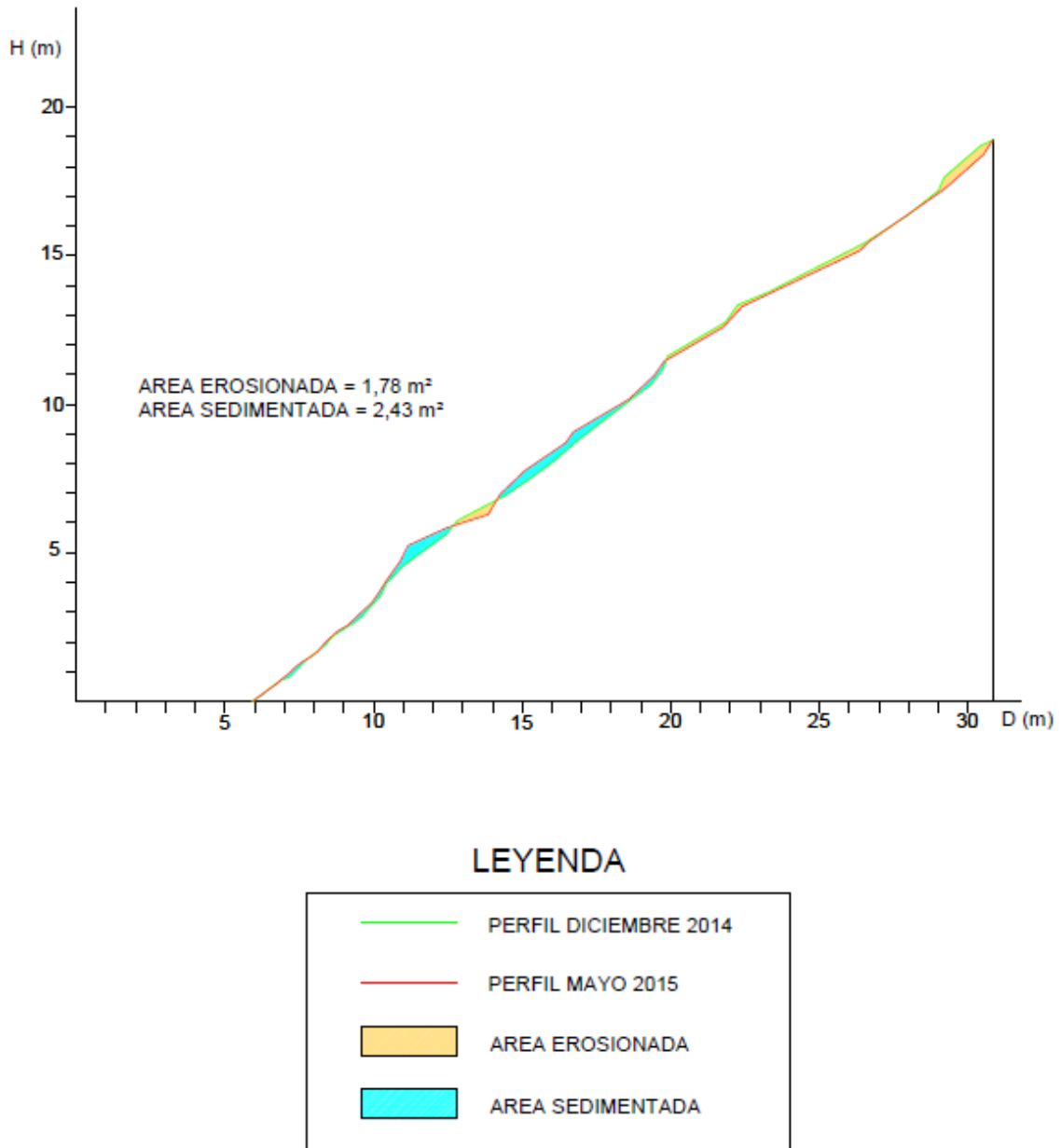


Figura 7.18. Comparación de perfiles entre las medidas de Diciembre y Mayo y las áreas de erosión y sedimentación.

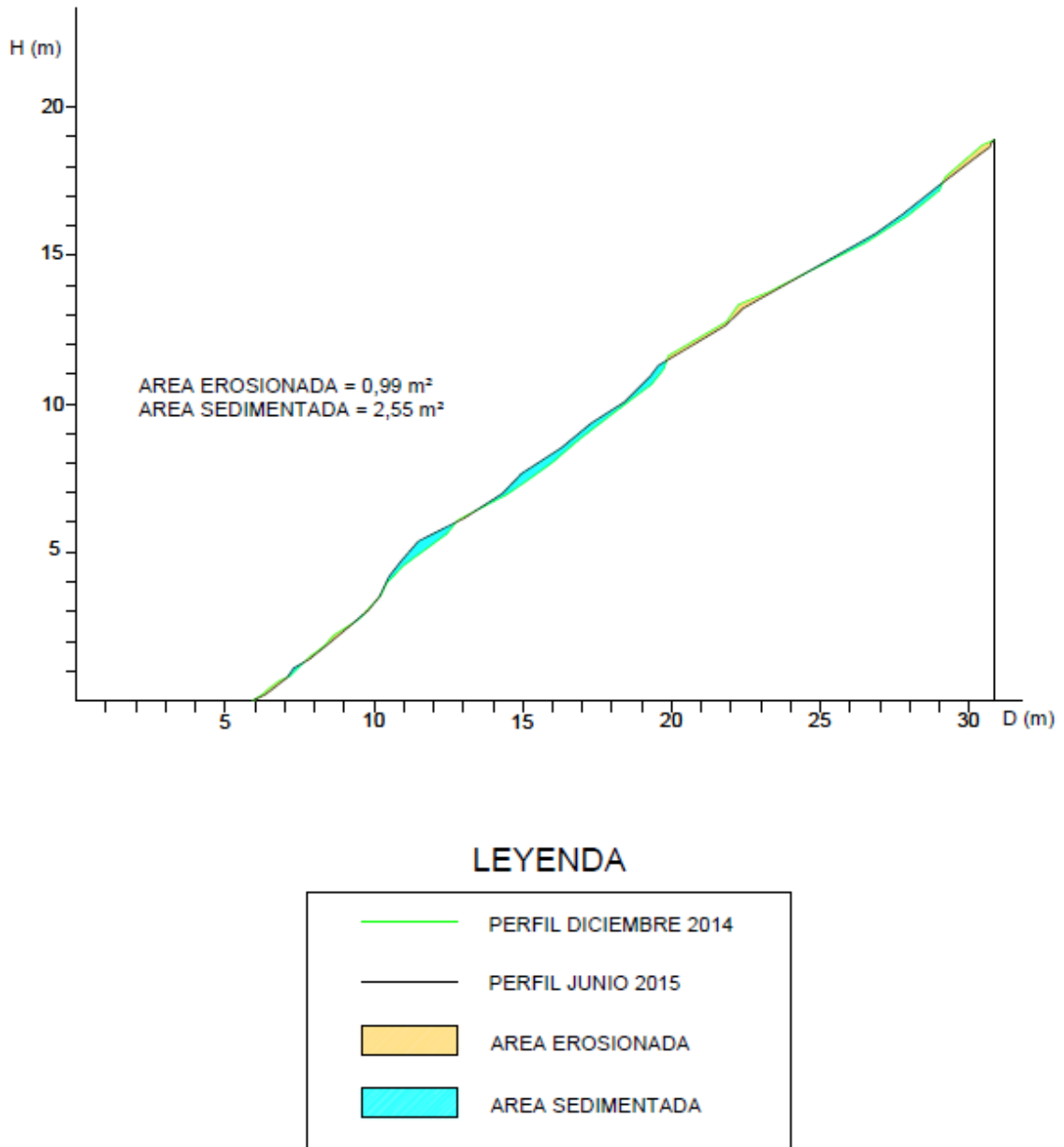


Figura 7.19. Comparación de perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y las áreas de erosión y sedimentación.

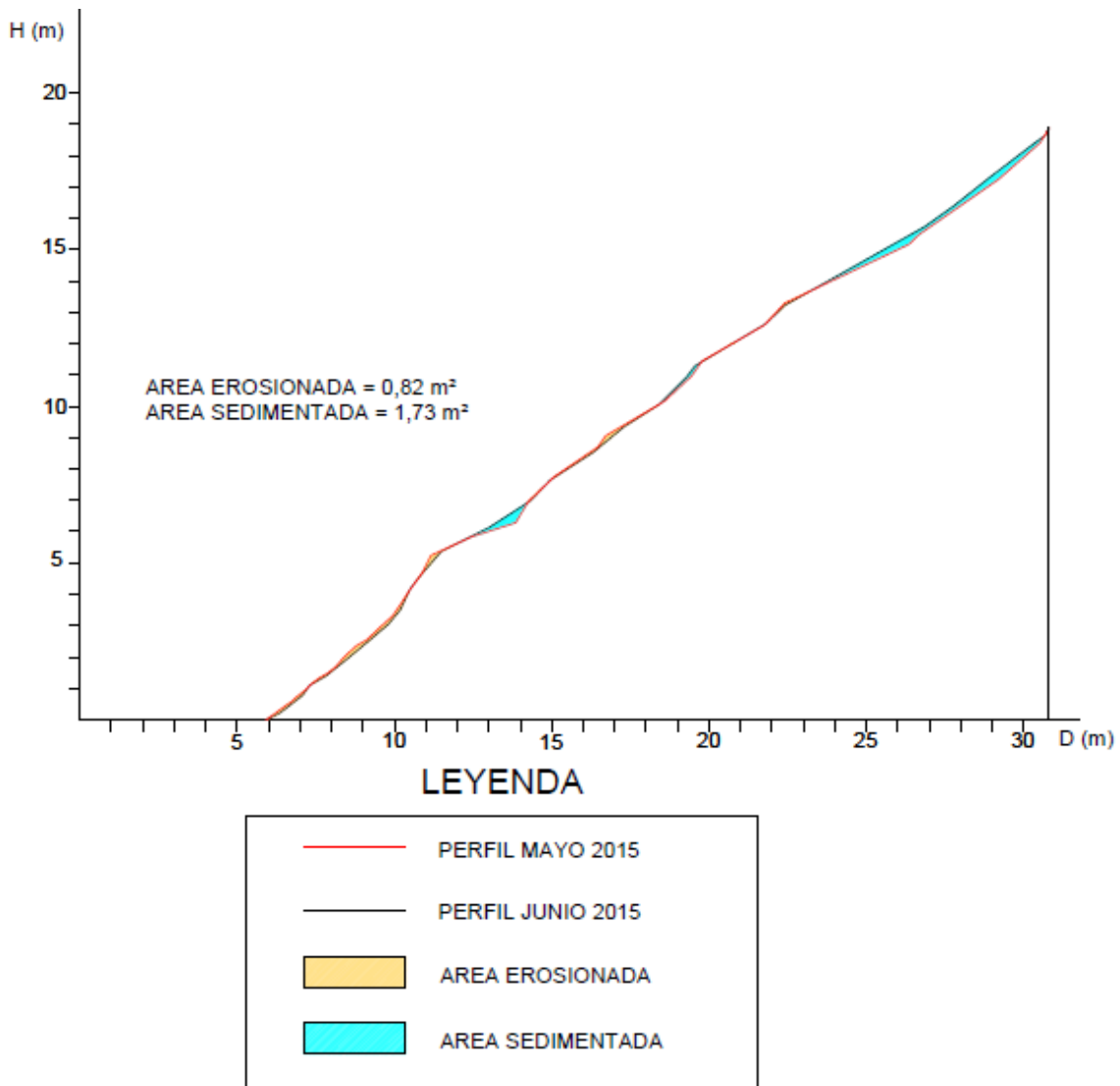


Figura 7.20. Comparación de perfiles entre las medidas de Mayo y Junio y las áreas de erosión y sedimentación.

En la Tabla 7.6 se muestran los resultados obtenidos para esta sección de control.

Tabla 7.6. Resultados para la sección de control 4.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	75,91	1,78	587,39	2,43	522,84	12,96	129,6
1-3	75,91	0,99	326,37	2,56	549,89	-44,8	-448
2-3	75,91	0,82	268,96	1,74	372,94	-20,88	-208,8

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo menos indica que no ha habido pérdida de suelo si no ganancia.

7.2.5. Sección de control 5

Para esta sección solo se pudo realizar las mediciones correspondientes a Diciembre y a Junio, debido a que en el mes de Mayo, la vegetación situada en el fondo de la cárcava imposibilitó encontrar el clavo de referencia, en la medida de Junio, si se consiguió identificar dicho clavo y realizar la medición de manera correcta. Por lo tanto para esta sección solo se dispone de la comparación del periodo 1-3 (Figura 7.23). En las Figuras 7.21 y 7.22 aparecen representados los perfiles correspondientes al mes de Diciembre y de Junio.

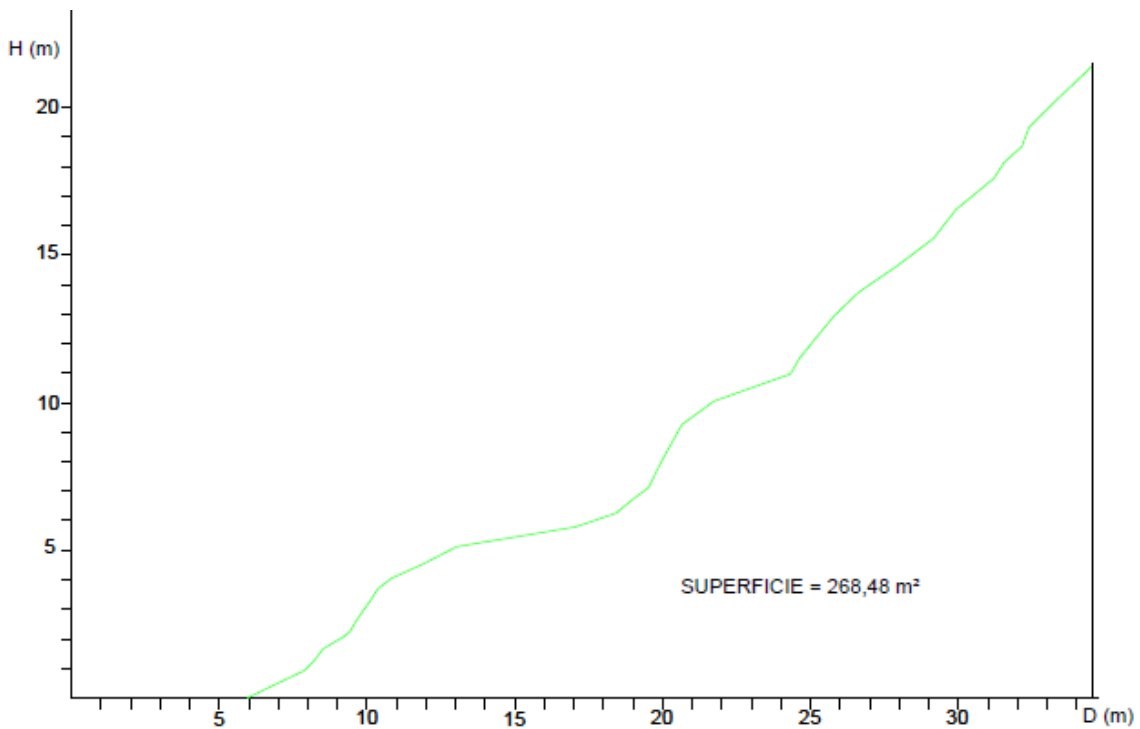


Figura 7.21. Representación del perfil correspondiente a la medida de Diciembre.

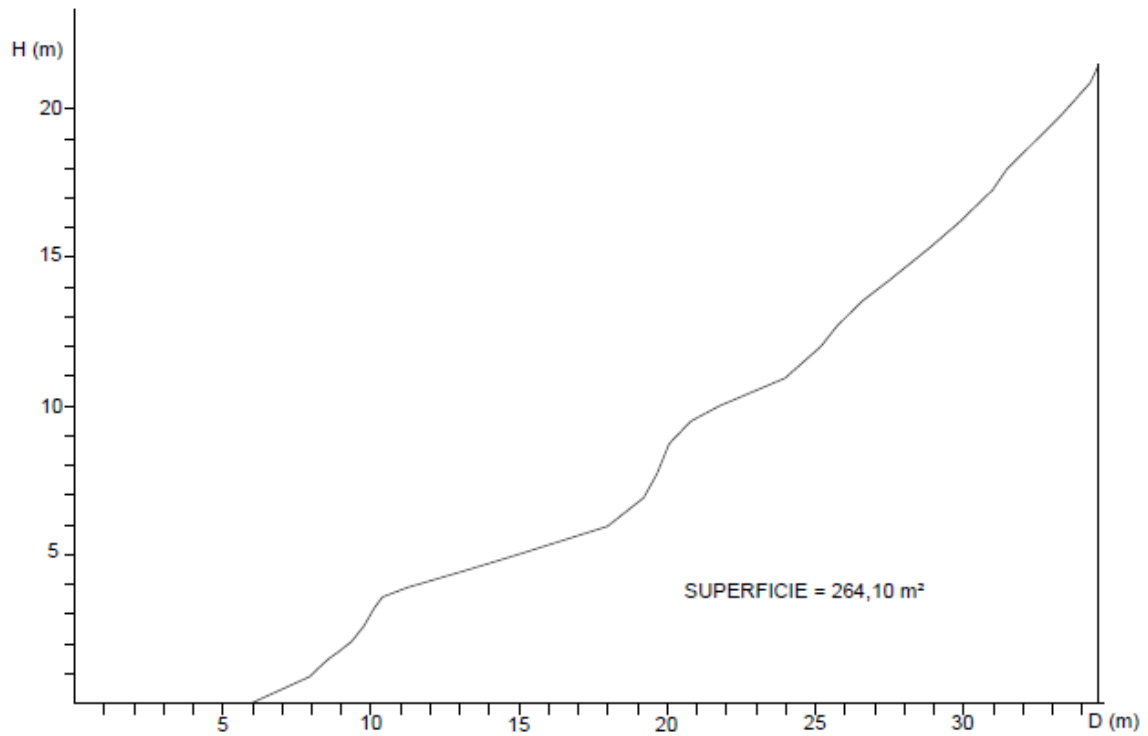


Figura 7.22. Representación del perfil correspondiente a la medida de Junio.

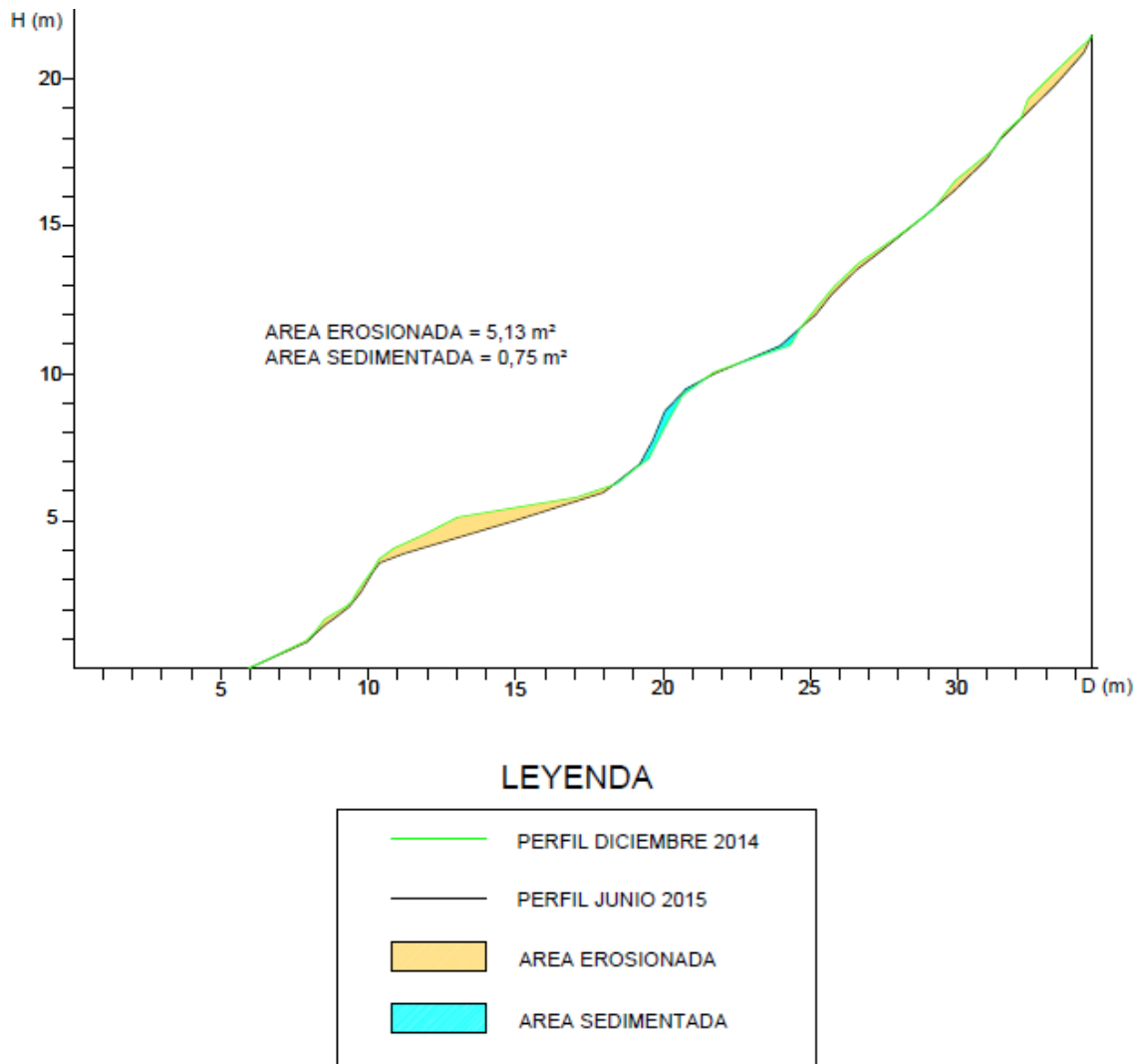


Figura 7.23. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

En la Tabla 7.7 se pueden ver los resultados obtenidos para esta sección de control.

Tabla 7.7. Resultados para la sección de control 5.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-3	75,05	5,13	1689,66	0,75	160,8	267,33	2673,3

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.6. Sección de control 6

Para esta sección se dispone de las tres mediciones, cuyos perfiles quedan representados en las Figuras 7.24, 7.25, y 7.26 respectivamente.

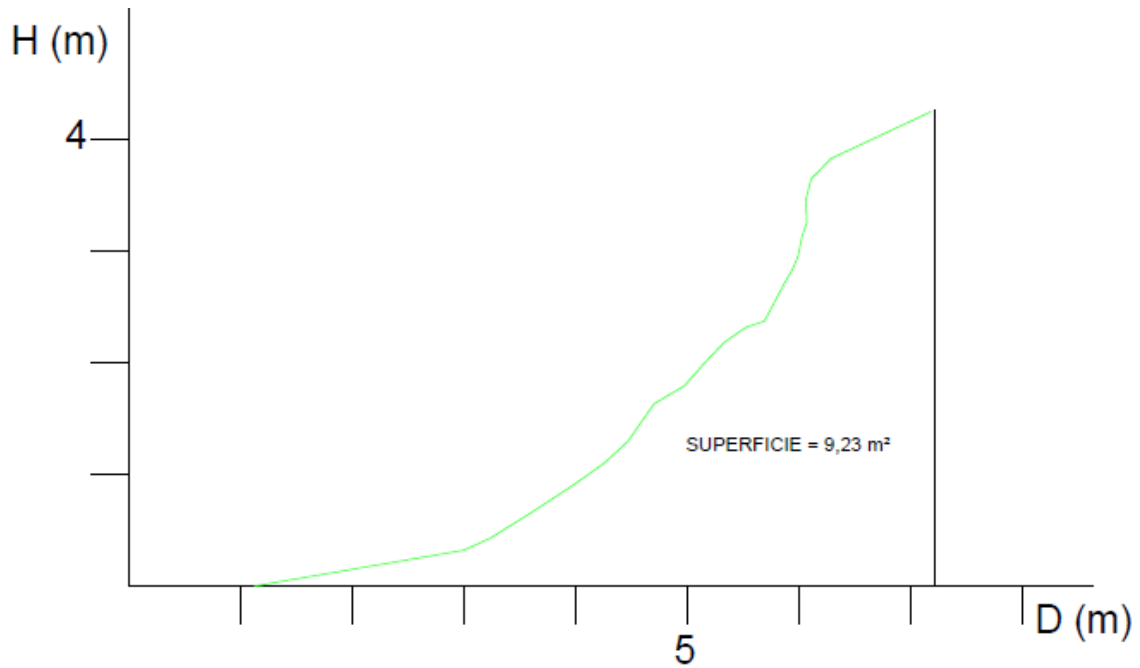


Figura 7.24. Perfil representado correspondiente a la medida de Diciembre de 2014.

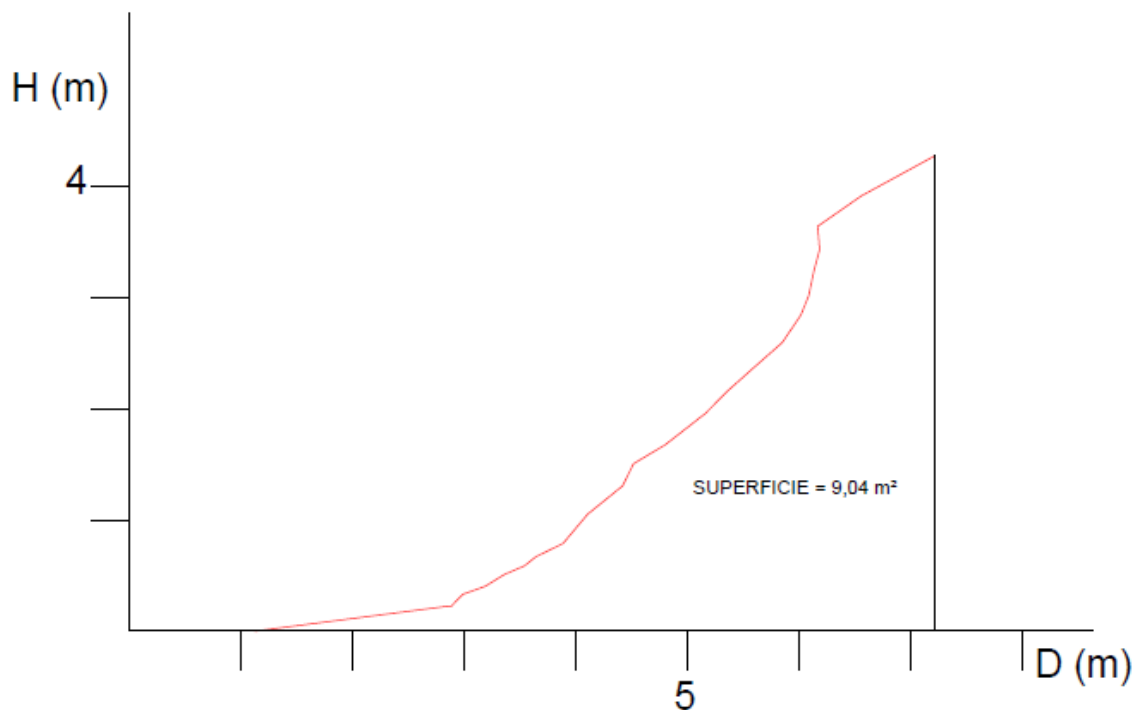


Figura 7.25. Perfil representado correspondiente a la medida de Mayo de 2015.

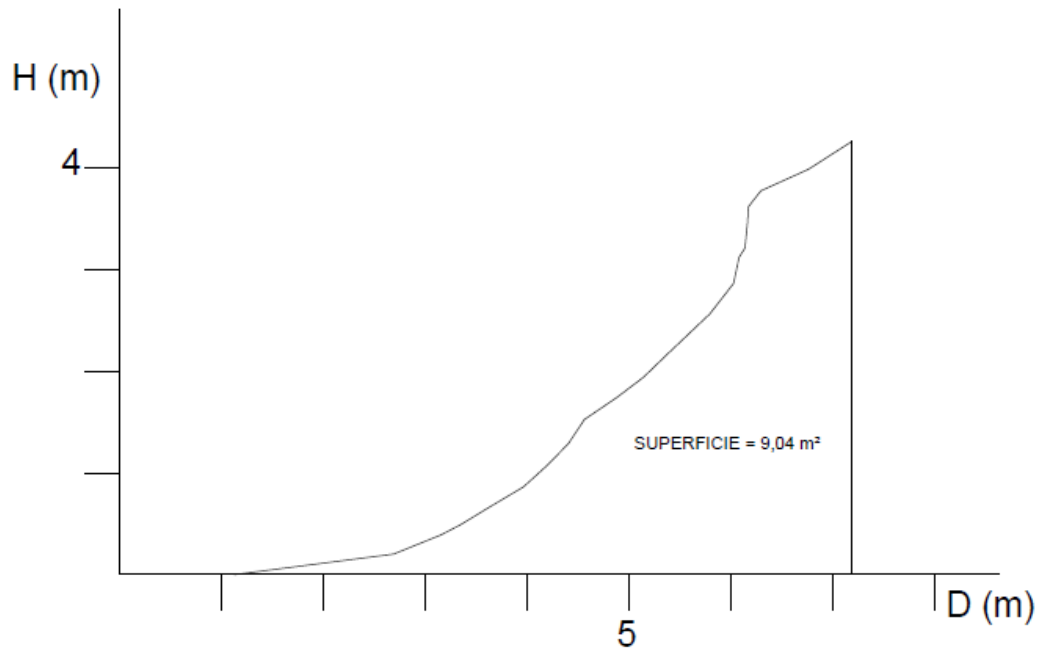


Figura 7.26. Perfil representado correspondiente a la medida de Junio de 2015.

A continuación se muestran las comparaciones de los perfiles para los diferentes periodos: 1-2 (Figura 7.27), 1-3 (Figura 7.28) y 2-3 (Figura 7.29).

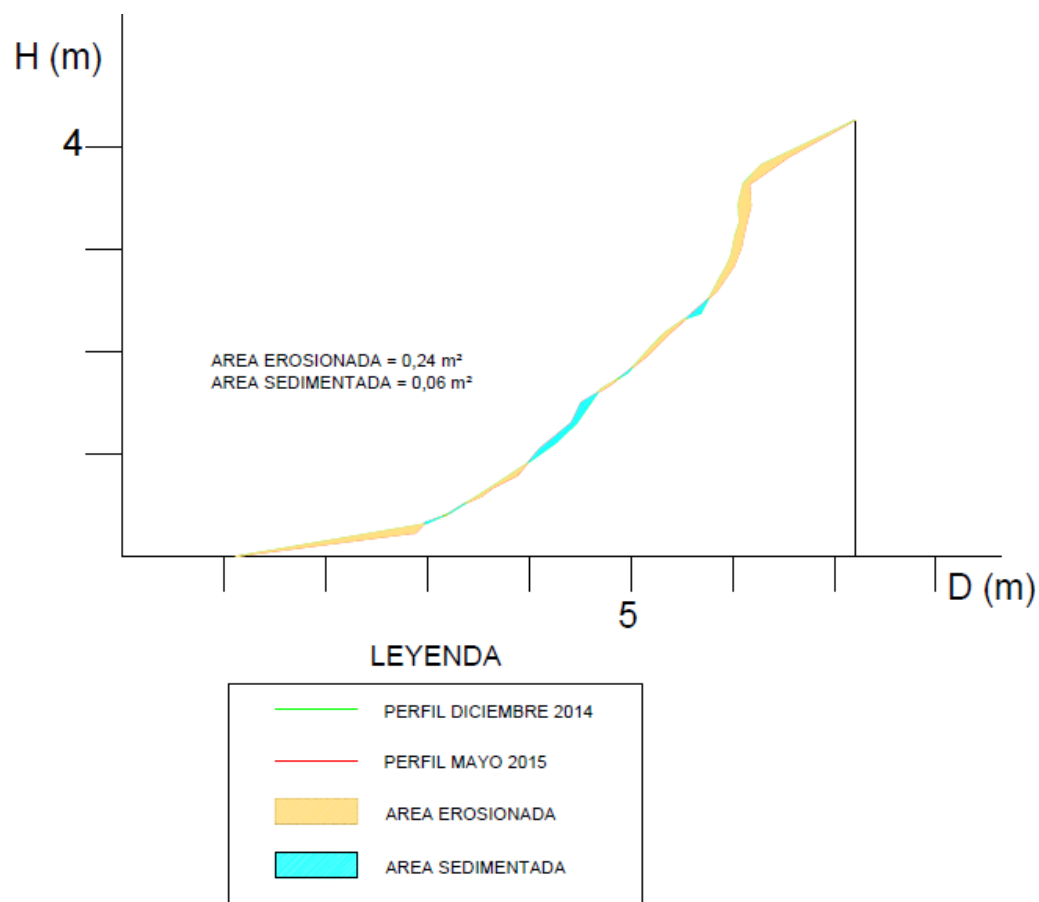


Figura 7.27. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Mayo y sus áreas de erosión y sedimentación.

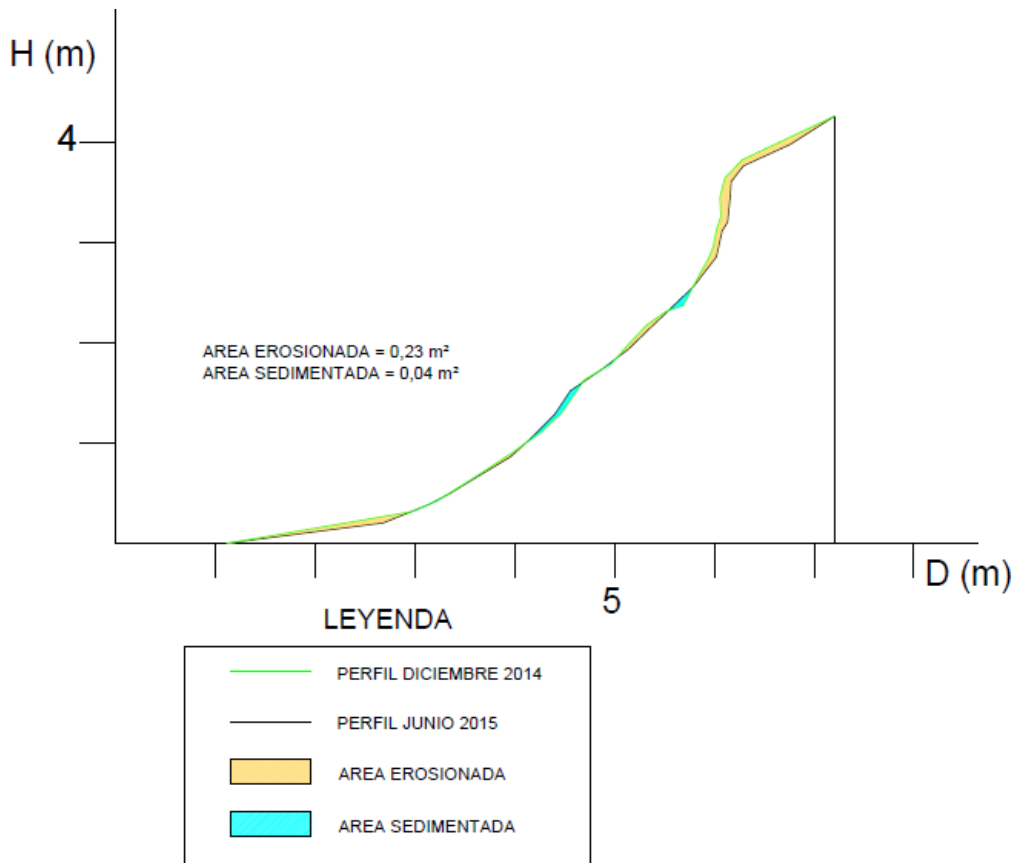


Figura 7.28. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

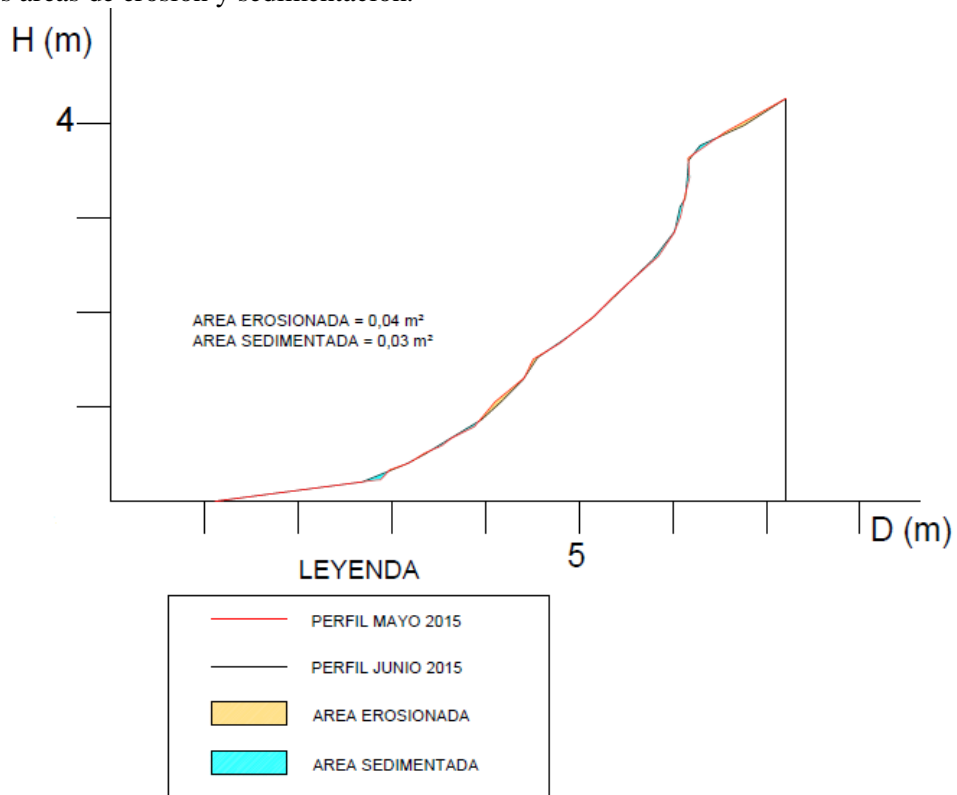


Figura 7.29. Comparación de los perfiles entre las medidas de Mayo y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

La Tabla 7.8. muestra los resultados para esta sección.

Tabla 7.8. Resultados para la sección de control 6.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	70,15	0,24	78,83	0,06	15,9	51,6	516
1-3	70,15	0,22	74,02	0,04	11,05	51,71	517,1
2-3	70,15	0,04	13,67	0,03	10,99	2,19	21,9

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.7. Sección de control 7

Las Figuras 7.30, 7.31 y 7.32 muestran los perfiles de Diciembre, Mayo y Junio respectivamente.

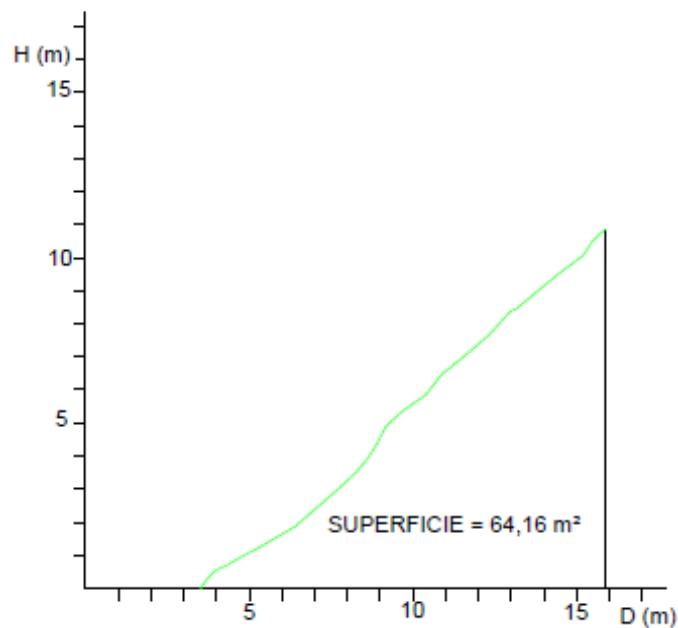


Figura 7.30. Perfil representado de la medida de Diciembre de 2014.

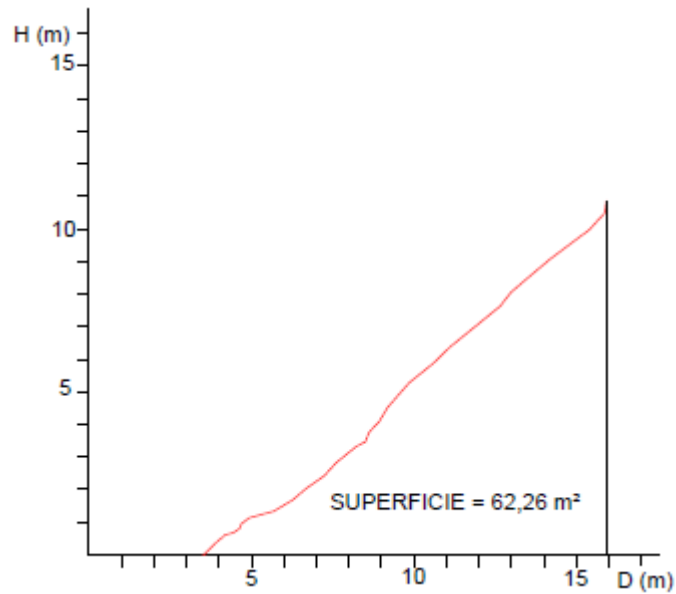


Figura 7.31. Perfil representado de la medida de Mayo de 2015.

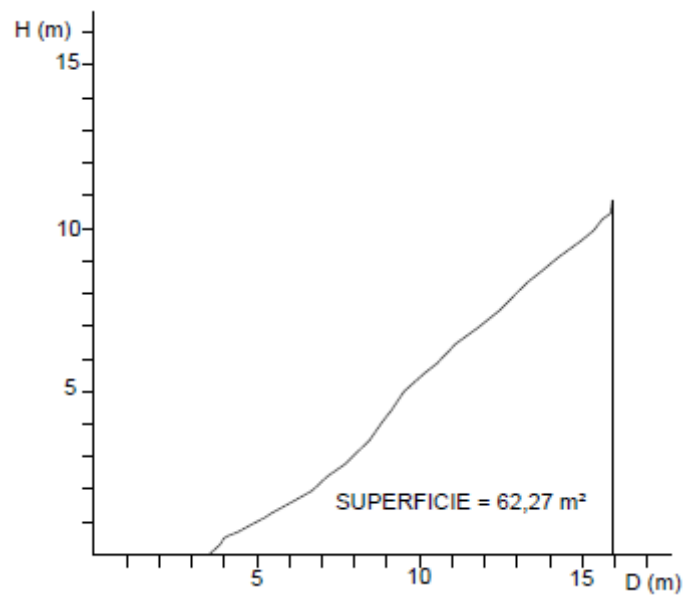


Figura 7.32. Perfil representado de la medida de Junio de 2015.

Las Figuras 7.33, 7.34 y 7.35 ilustran la comparación de los perfiles para los periodos 1-2, 1-3 y 2-3 respectivamente y que se pueden ver a continuación.

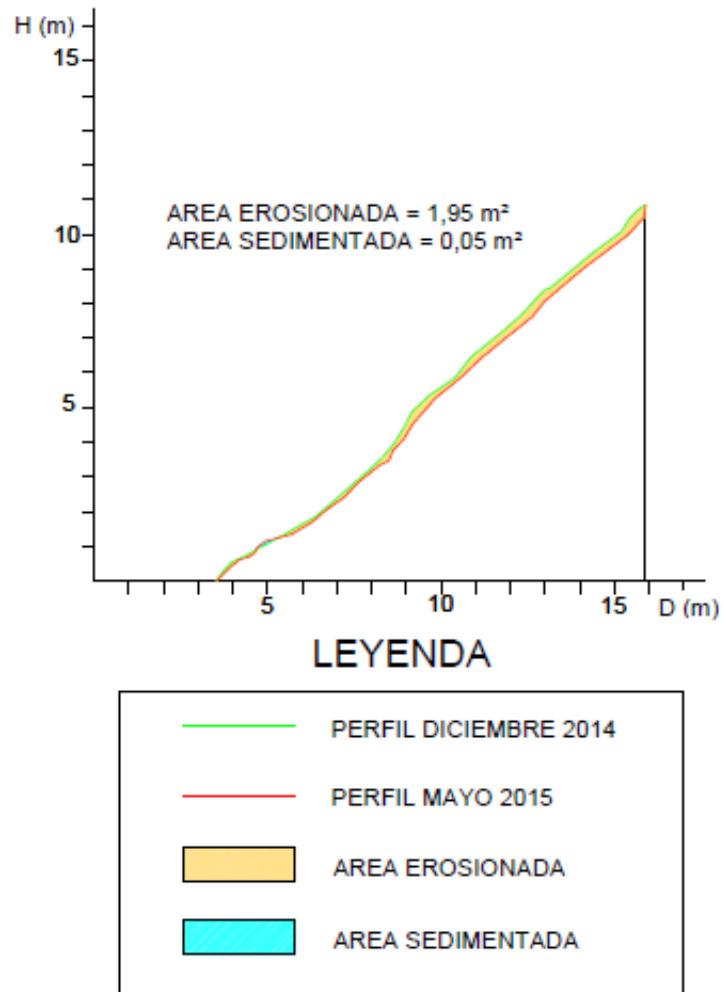


Figura 7.33. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Mayo y sus áreas de erosión y sedimentación.

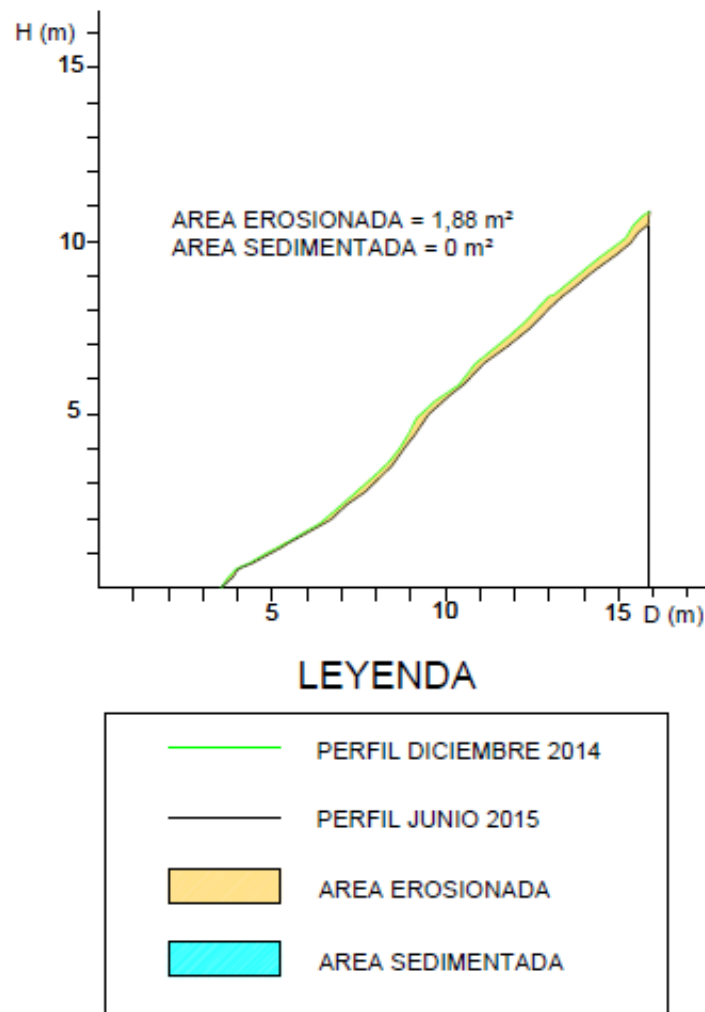


Figura 7.34. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

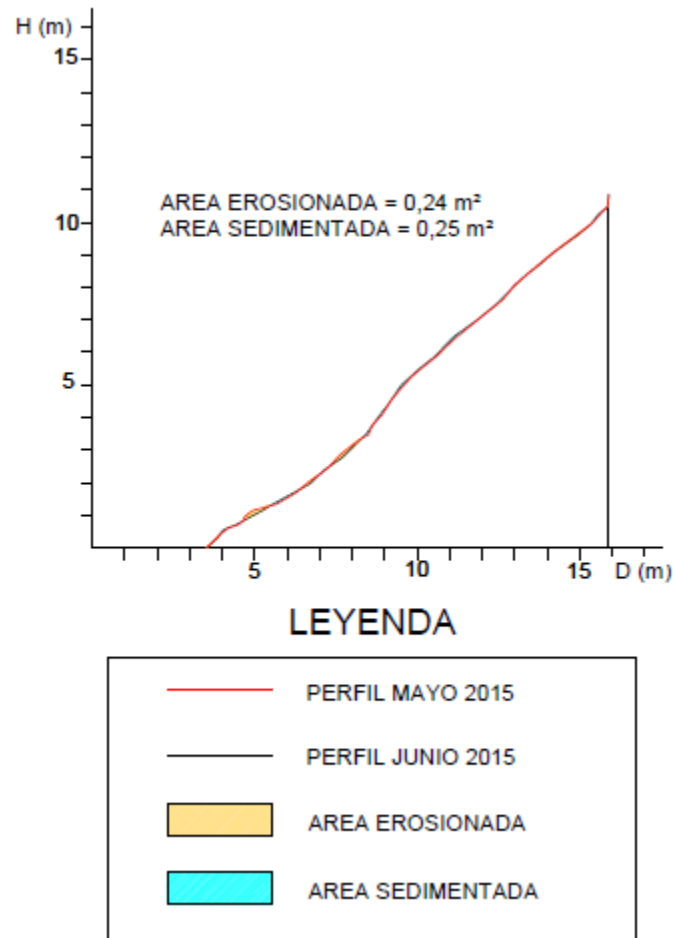


Figura 7.35. Comparación de los perfiles entre las medidas de Mayo y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

La Tabla 7.9 refleja los resultados correspondientes a esta sección de control.

Tabla 7.9. Resultados para la sección de control 7.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	87,64	1,95	724,36	0,05	11,38	289,14	2891,4
1-3	87,64	1,88	699,46	0	0	283,6	2836,6
2-3	87,64	0,24	87,51	0,25	53,71	13,71	137,1

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.8. Sección de control 8

Los perfiles correspondientes a esta sección aparecen representados en las Figuras 7.36 (Diciembre), 7.37 (Mayo) y 7.38 (Junio).

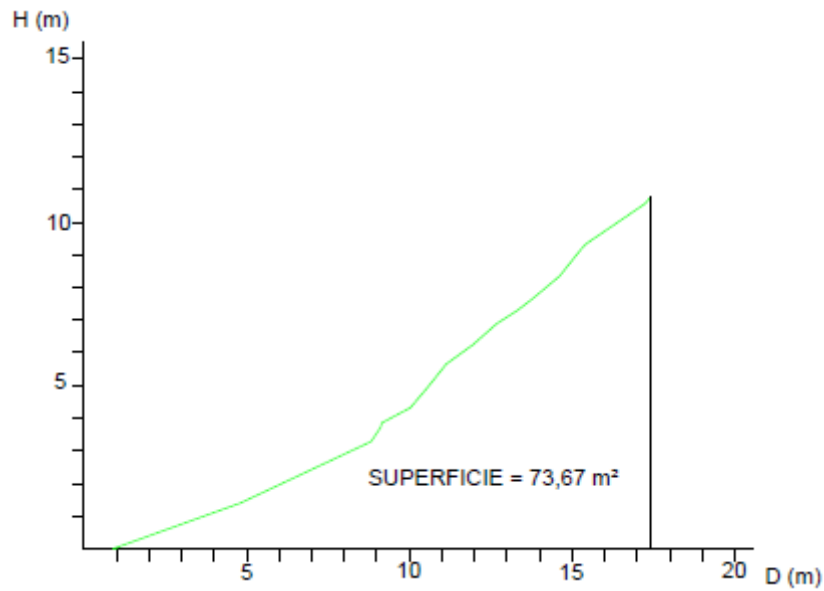


Figura 7.36. Perfil representado de la medida de Diciembre de 2014.

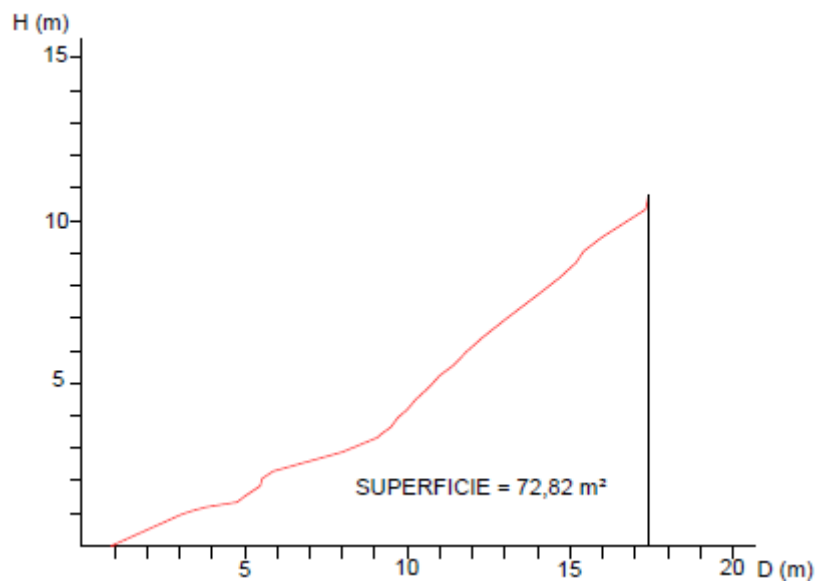


Figura 7.37. Perfil representado de la medida de Mayo de 2015.

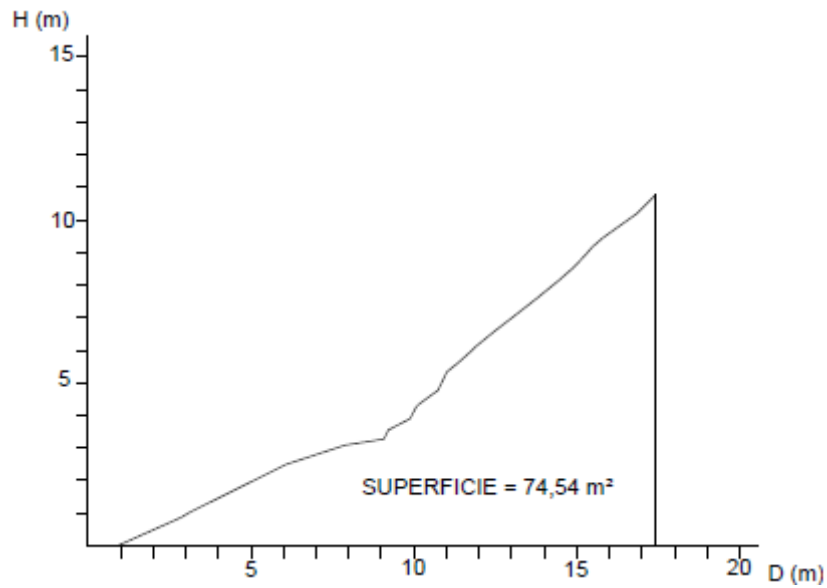


Figura 7.38. Perfil representado de la medida de Junio de 2015.

En la Figura 7.39. se muestra la comparación de perfiles correspondientes al periodo 1-2.

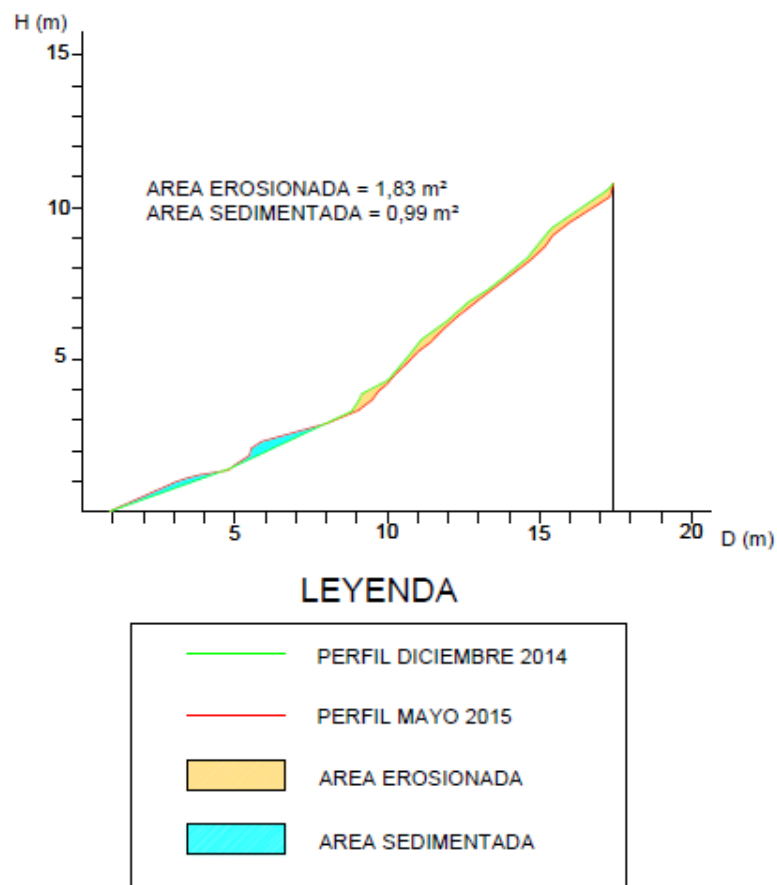


Figura 7.39. Comparación de los perfiles del periodo 1-2 y sus áreas de erosión y sedimentación.

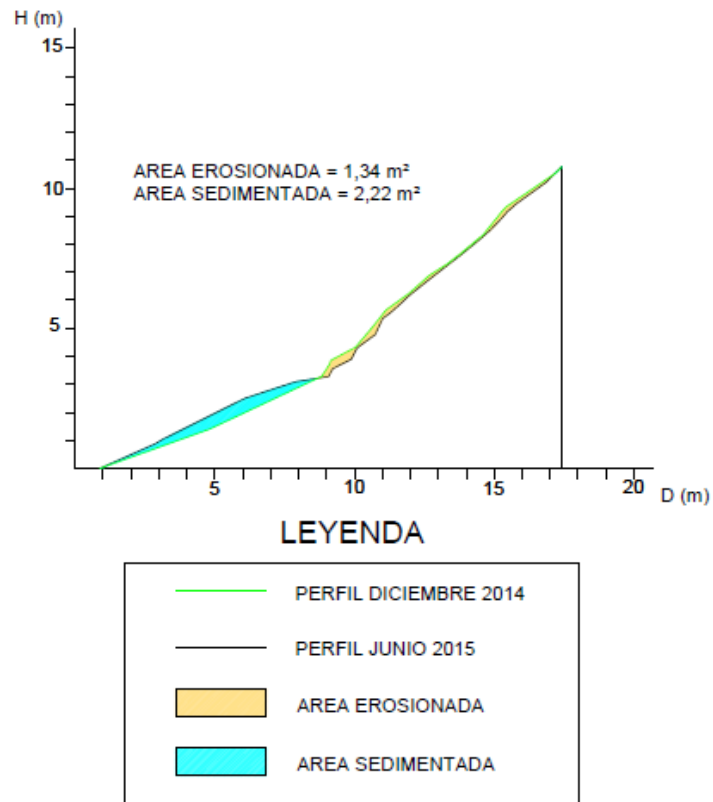


Figura 7.40. Comparación de los perfiles del periodo 1-3 y sus áreas de erosión y sedimentación.

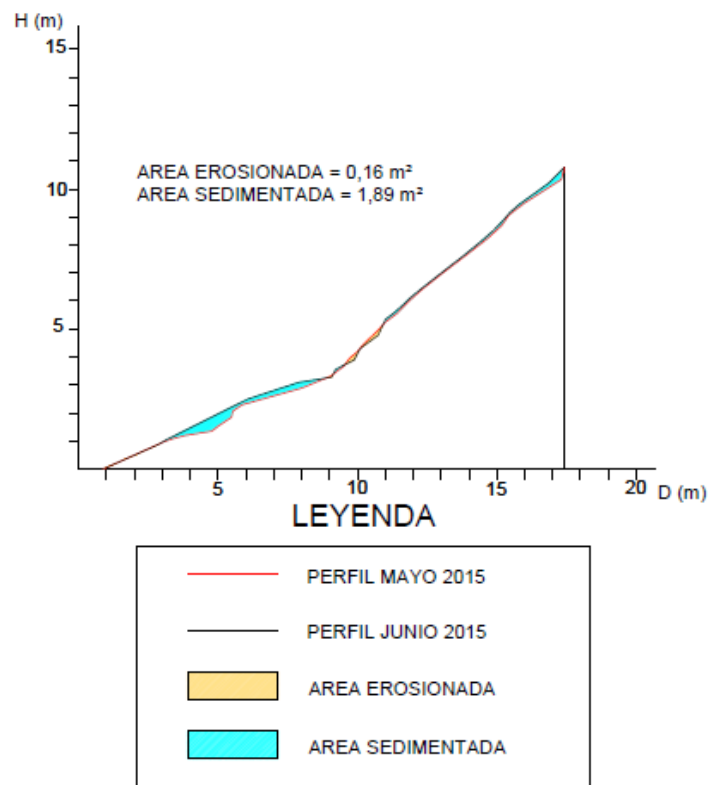


Figura 7.41. Comparación de los perfiles del periodo 2-3 y sus áreas de erosión y sedimentación.

En la Tabla 7.10. se muestran los resultados de esta sección de control.

Tabla 7.10. Resultados para la sección de control 8.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	65,18	1,83	681,44	0,99	211,88	141,77	1417,7
1-3	65,18	1,34	498,72	2,21	476,81	6,62	66,2
2-3	65,18	0,16	60,01	1,89	405,38	-104,27	-1042,7

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo menos indica que no ha habido pérdida de suelo si no ganancia.

7.2.9. Sección de control 9

El perfil correspondiente a la medida de Diciembre aparece representado en la Figura 7.42.

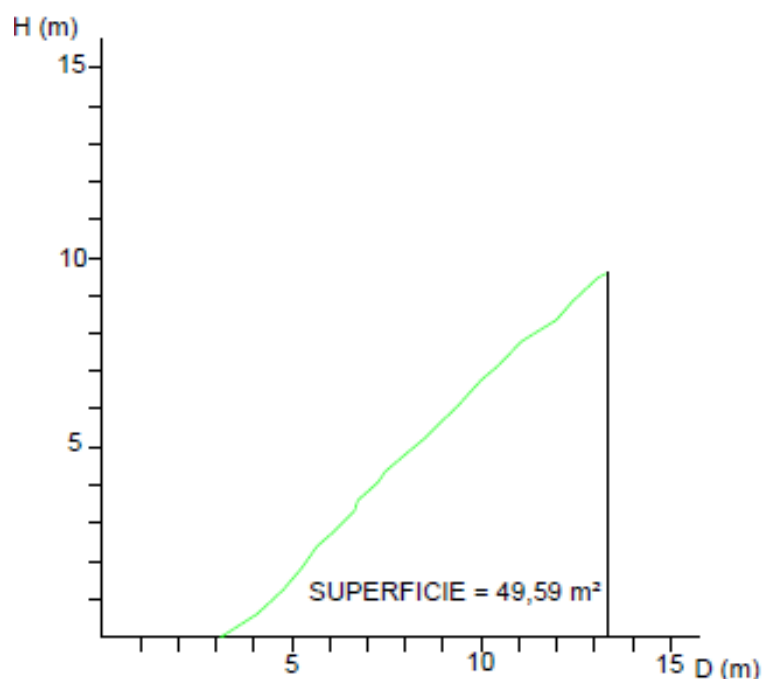


Figura 7.42. Perfil correspondiente a Diciembre de 2014.

El perfil correspondiente a Mayo de 2015, se observa en la Figura 7.43.

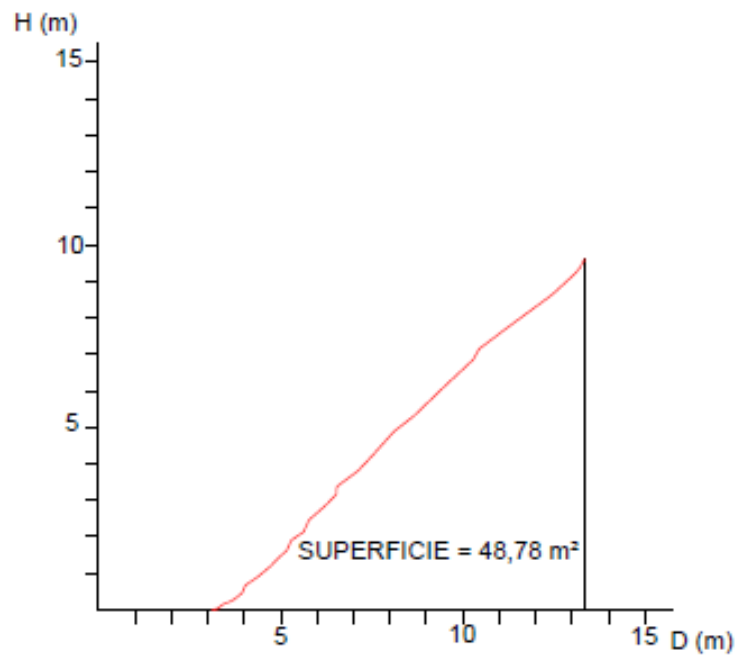


Figura 7.43. Perfil correspondiente a Mayo de 2015.

La Figura 7.44 ilustra el perfil correspondiente a Junio de 2015.

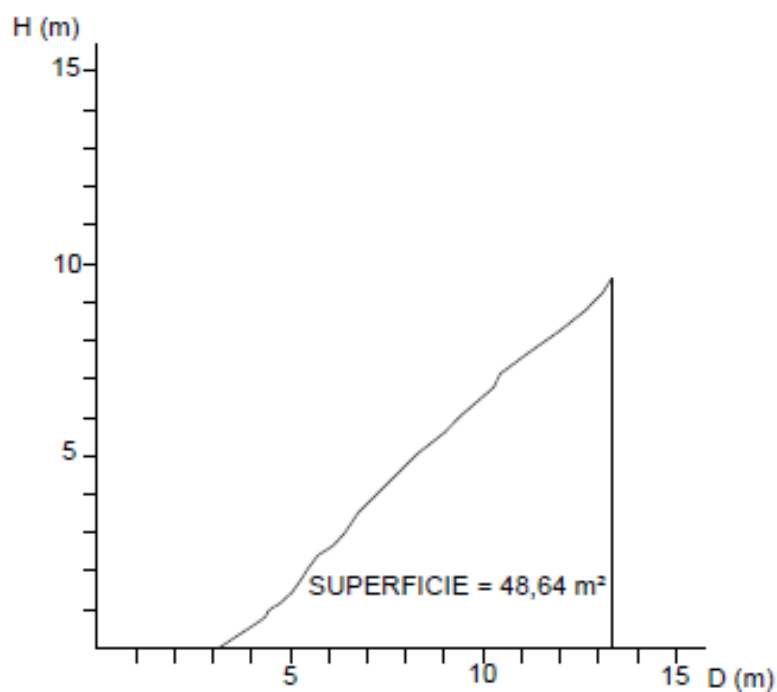


Figura 7.44. Perfil correspondiente a Junio de 2015.

Las Figuras 7.45, 7.46 y 7.47 se corresponden con la comparación de perfiles del periodo 1-2, 1-3 y 2-3 respectivamente.

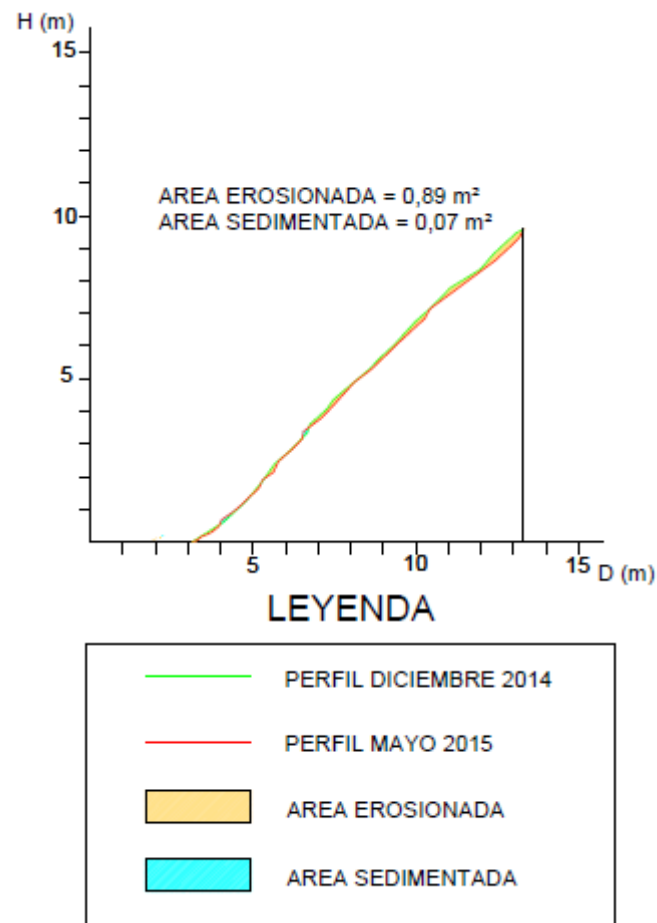


Figura 7.45. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-2.

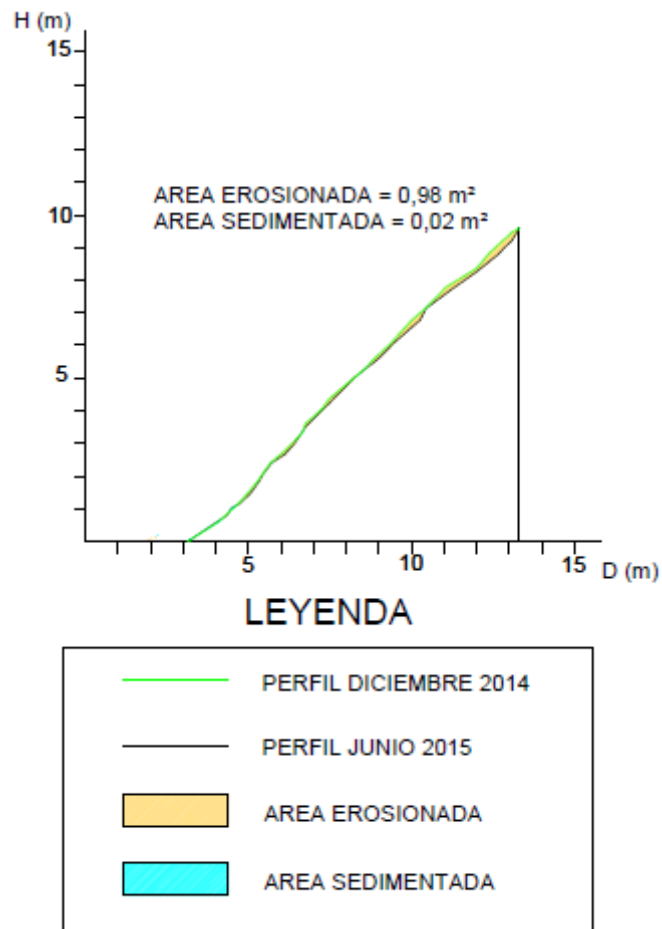


Figura 7.46. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-3.

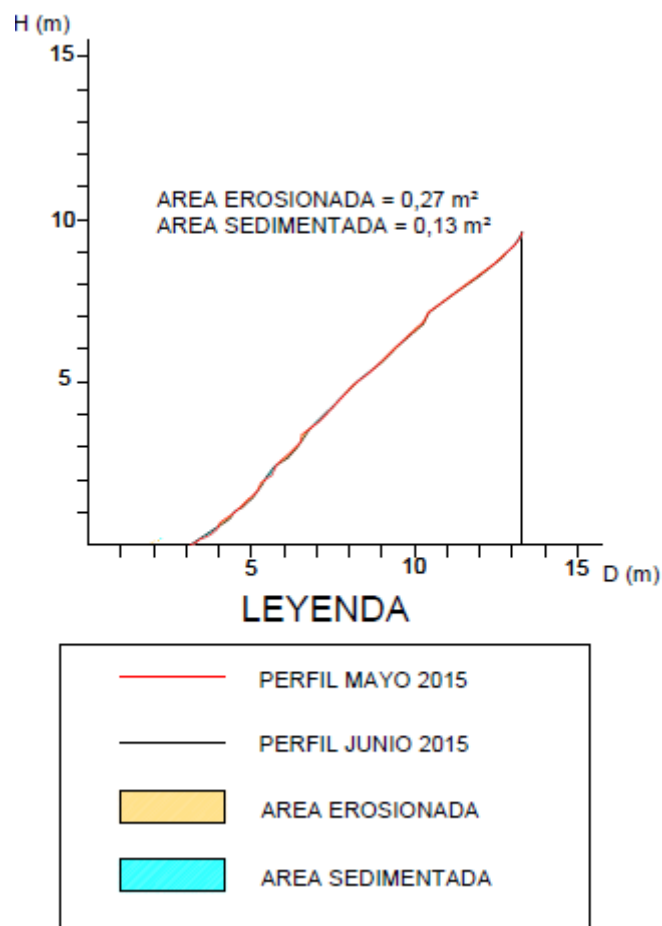


Figura 7.47. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 2-3.

En la Tabla 7.11. aparecen los resultados de esta sección de control.

Tabla 7.11. Resultados para la sección de control 9.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	94,29	0,89	330,2	0,07	15,11	160,42	1604,2
1-3	94,29	0,98	363,42	0,02	4,17	182,9	1829,1
2-3	94,29	0,27	99,03	0,13	27,09	36,62	366,2

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.10. Sección de control 10

Los perfiles representados de esta sección se pueden ver en las Figuras 7.48, 7.49 y 7.50.

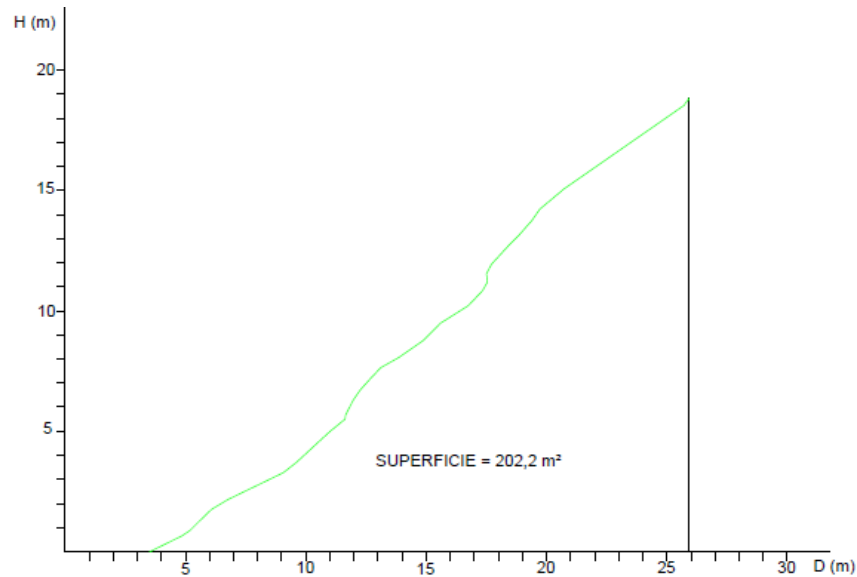


Figura 7.48. Perfil correspondiente a Diciembre de 2014.

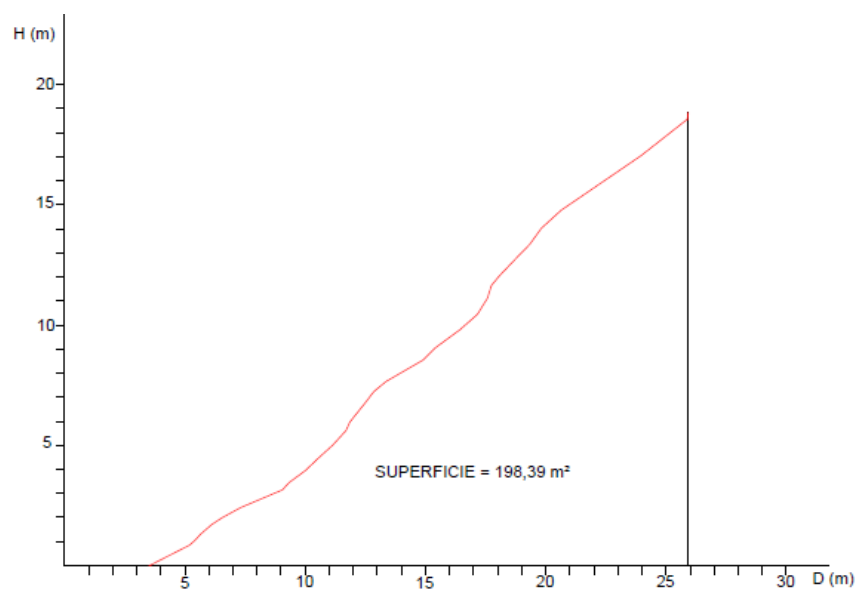


Figura 7.49. Perfil correspondiente a Mayo de 2015.

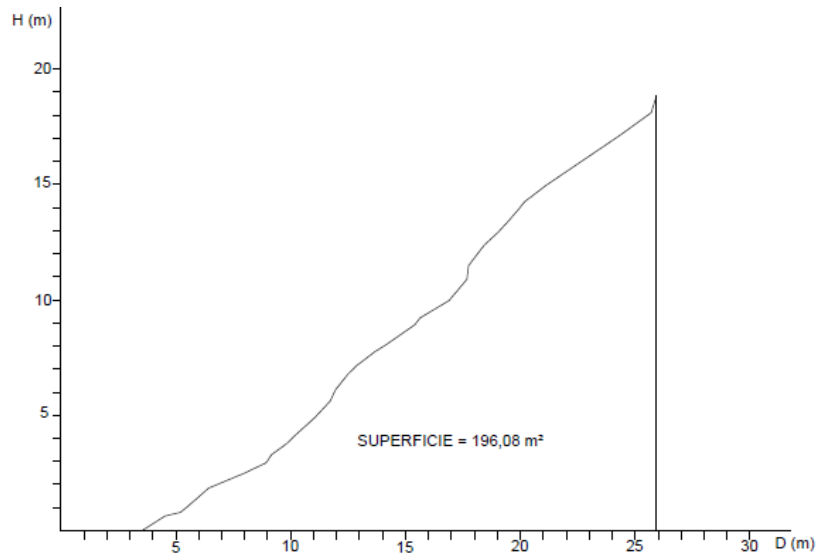


Figura 7.50. Perfil correspondiente a Junio de 2015.

La comparación correspondiente al periodo 1-2 aparece a continuación (Figura 7.51).

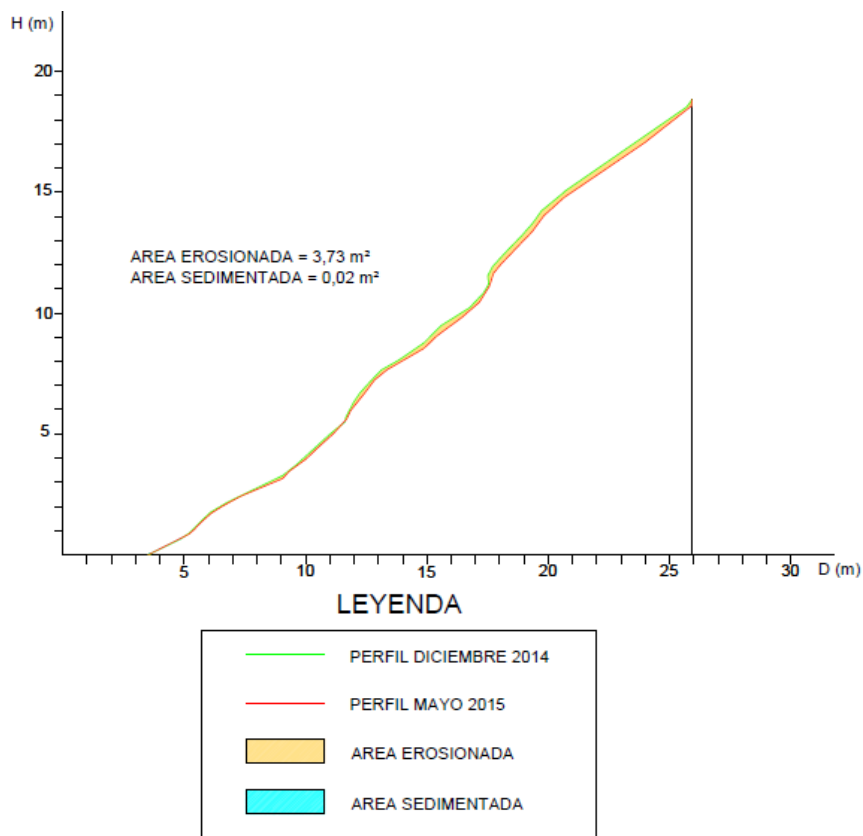


Figura 7.51. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-2.

El periodo 1-3 se puede ver en la Figura 7.51 y el 2-3 en la Figura 7.52.

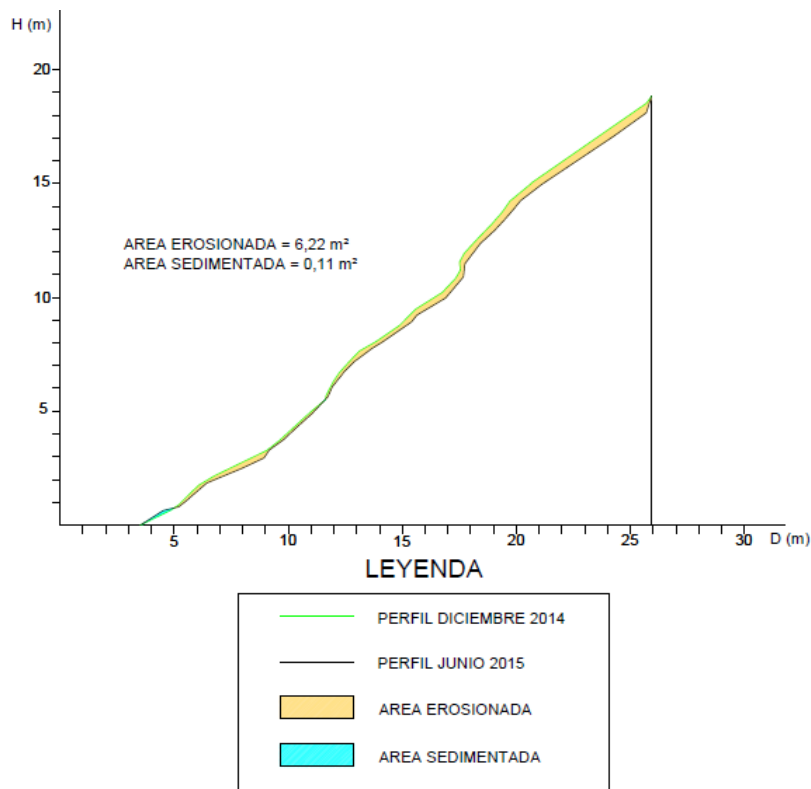


Figura 7.52. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-3.

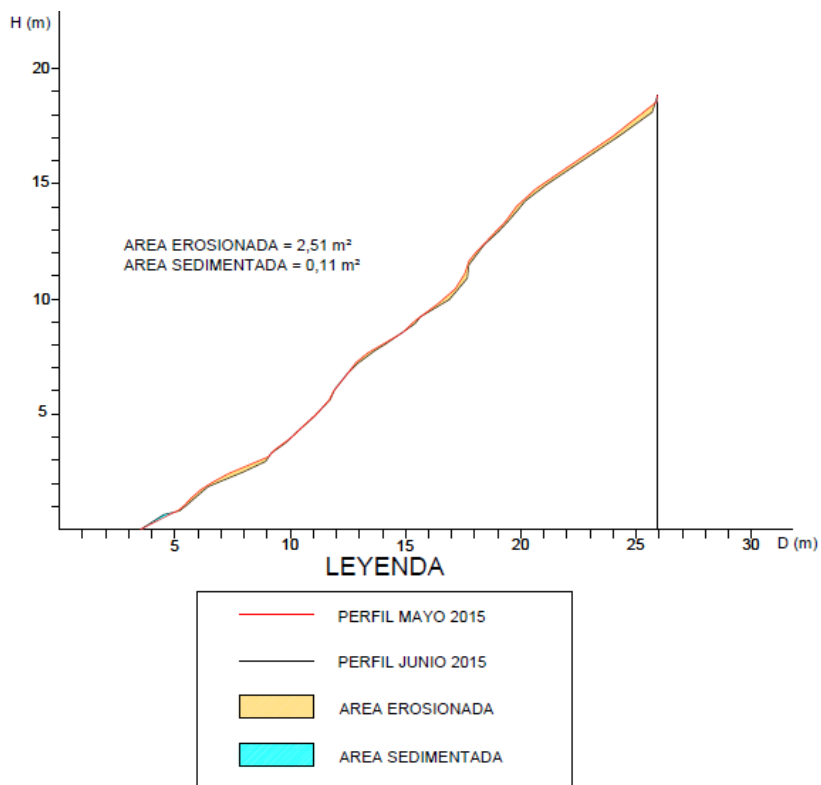


Figura 7.53. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 2-3.

Los resultados para esta sección de control quedan reflejados en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12. Resultados para la sección de control 10.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	84,05	3,73	1385,55	0,02	4,37	308,42	3084,2
1-3	84,05	6,22	2311,84	0,11	23,63	510,97	5109,7
2-3	84,05	2,51	934,5	0,12	23,95	203,32	2033,2

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.11. Sección de control 11

El perfil correspondiente a la medida de Diciembre de 2014 aparece en la Figura 7.54.

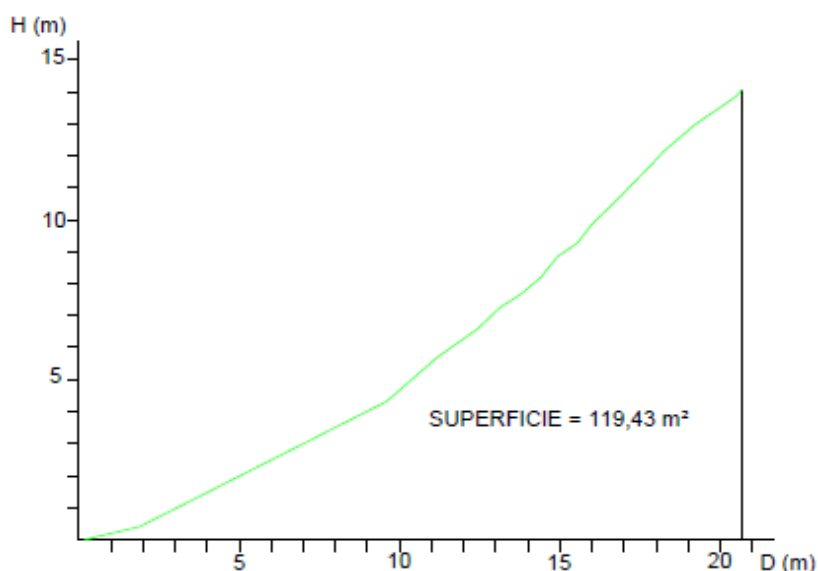


Figura 7.54. Perfil correspondiente a Diciembre de 2014.

En la Figura 7.55 aparece la representación del perfil correspondiente a la medida de Mayo de 2015.

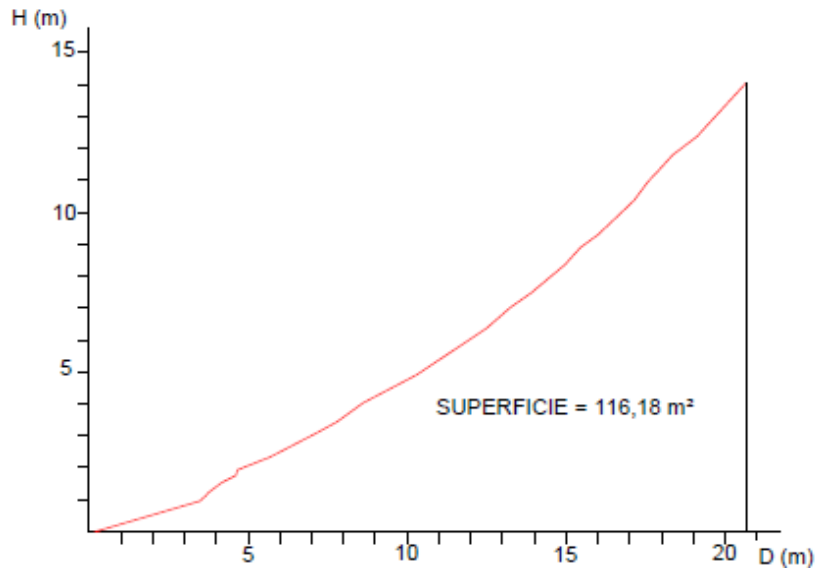


Figura 7.55. Perfil correspondiente a Mayo de 2015.

El perfil correspondiente a la medida de Junio de 2015 se representa en la Figura 7.56.

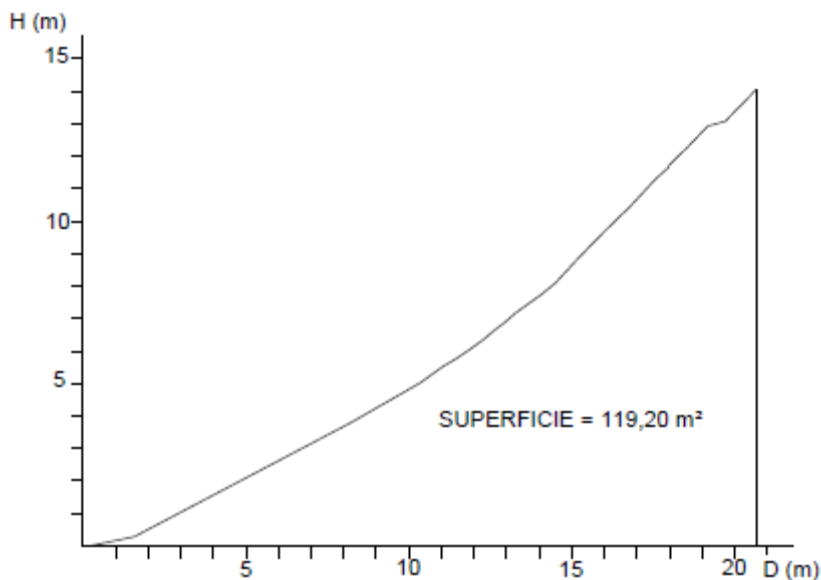


Figura 7.56. Perfil correspondiente a Junio de 2015.

Las Figuras 7.57, 7.58 y 7.59 indican las comparaciones, áreas de erosión y sedimentación para los diferentes periodos de estudio.

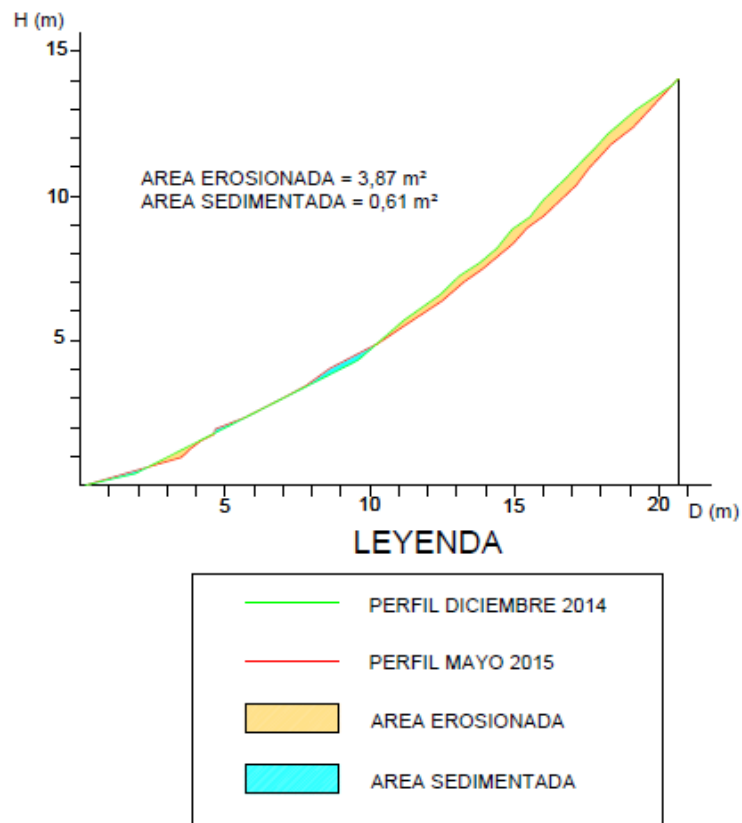


Figura 7.57. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-2.

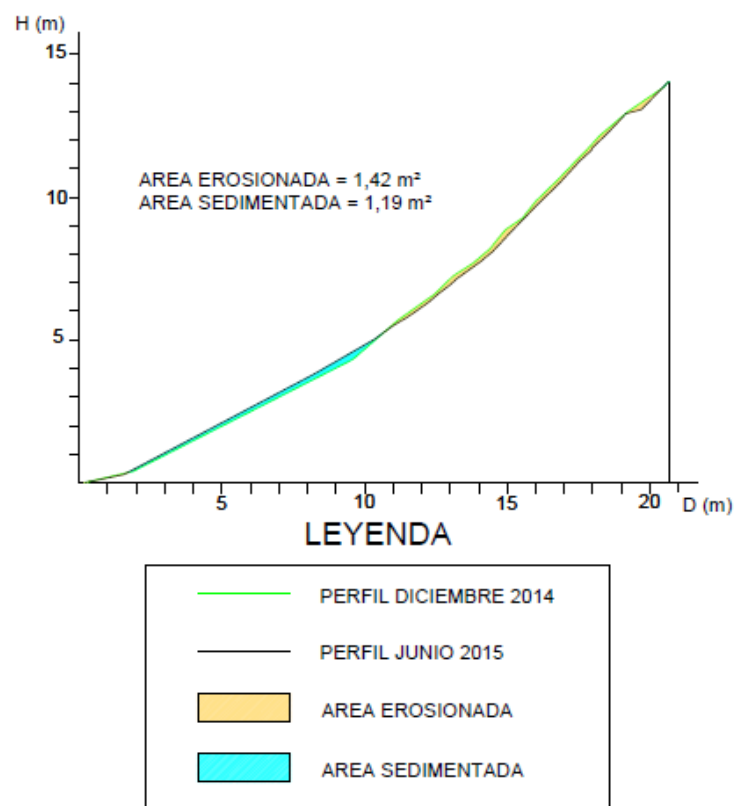


Figura 7.58. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-3.

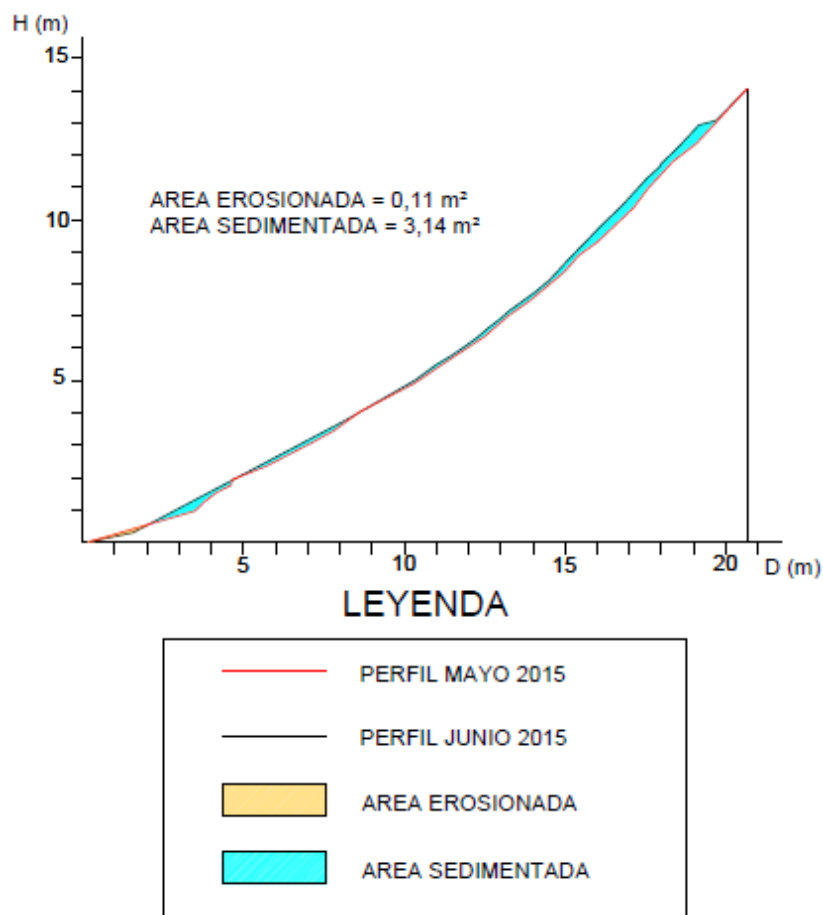


Figura 7.59. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 2-3.

Los resultados correspondientes a esta sección de control se muestran en la Tabla 7.13.

Tabla 7.13. Resultados para la sección de control 11.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	68,66	3,87	1436,83	0,61	131,58	318,91	3189,1
1-3	68,66	1,42	529,27	1,19	256,65	66,61	666,1
2-3	68,66	0,11	42,29	3,14	674,5	-154,47	-1544,7

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo menos indica que no ha habido pérdida de suelo si no ganancia.

7.2.12. Sección de control 12

Los perfiles calculados para esta sección aparecen representados en las Figuras 7.60 (Diciembre), 7.61 (Mayo) y 7.62 (Junio).

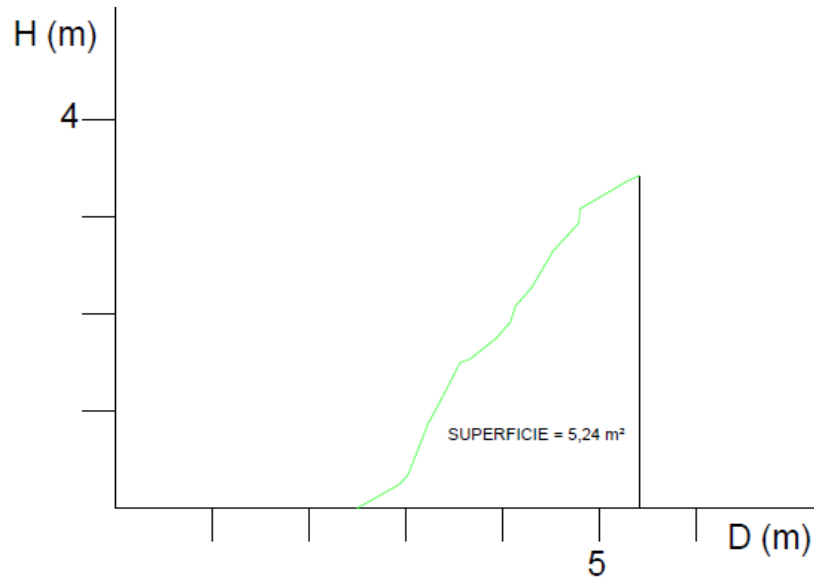


Figura 7.60. Perfil correspondiente a Diciembre de 2014.

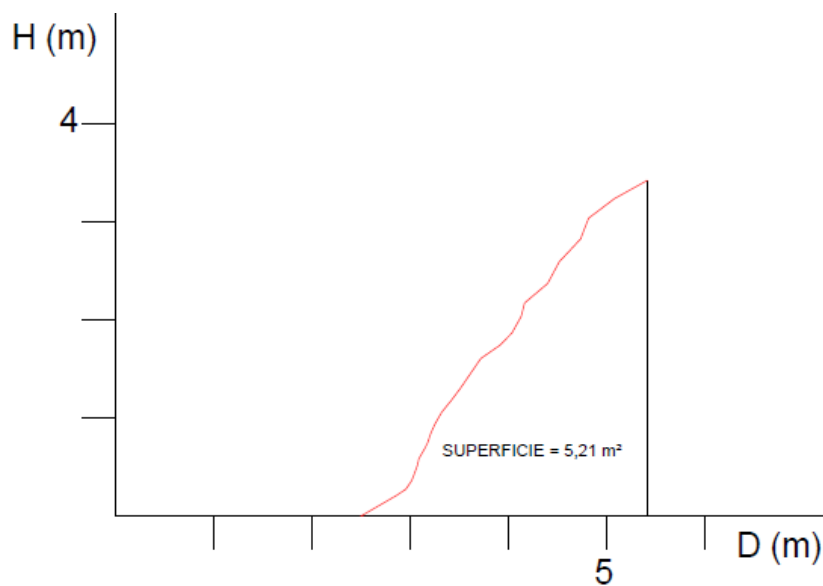


Figura 7.61. Perfil correspondiente a Mayo de 2015.

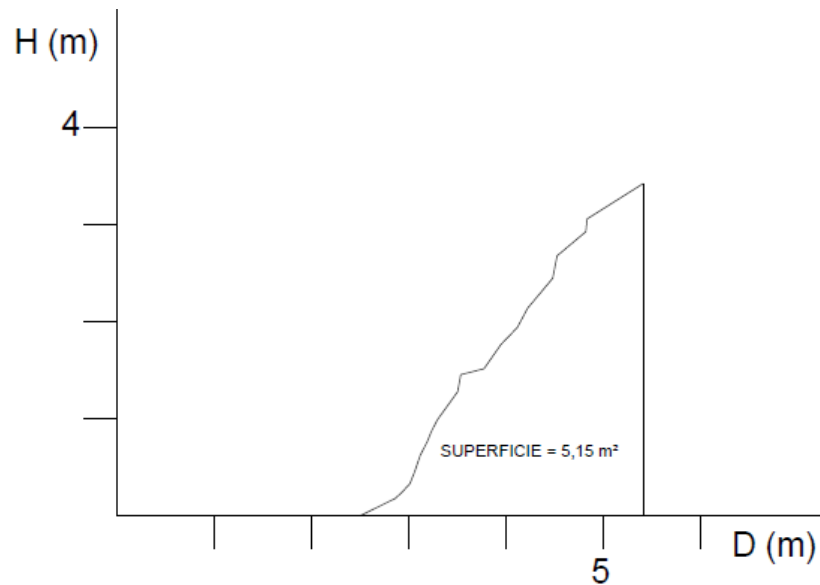


Figura 7.62. Perfil correspondiente a Junio de 2015.

La Figura 7.63 muestra la comparación de perfiles para el periodo de estudio 1-2.

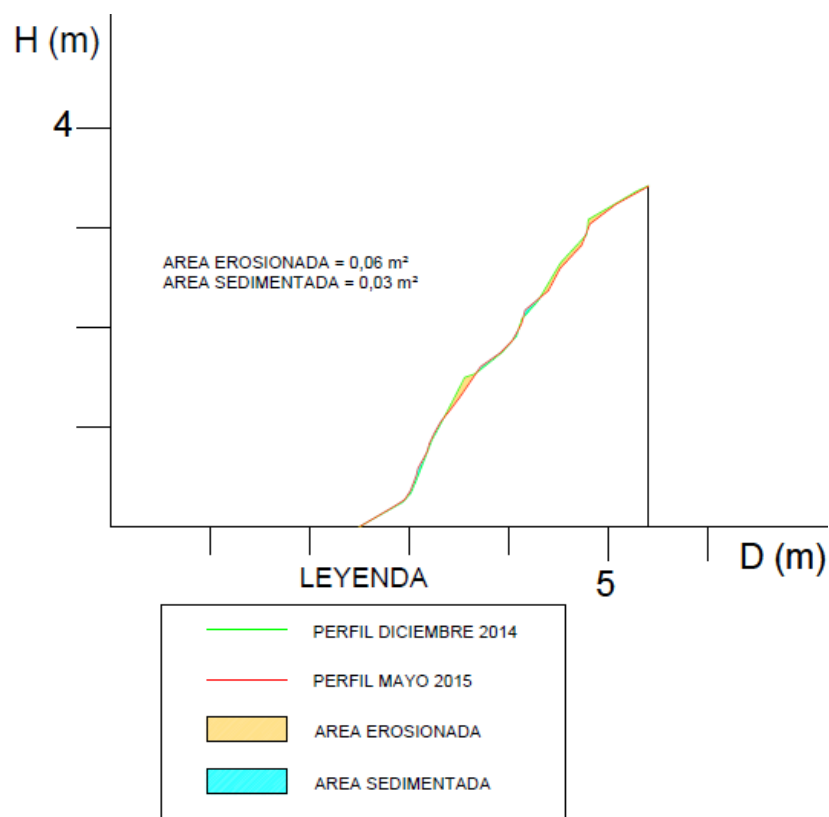


Figura 7.63. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-2.

La comparación del periodo 1-3 aparece en la Figura 7.64.

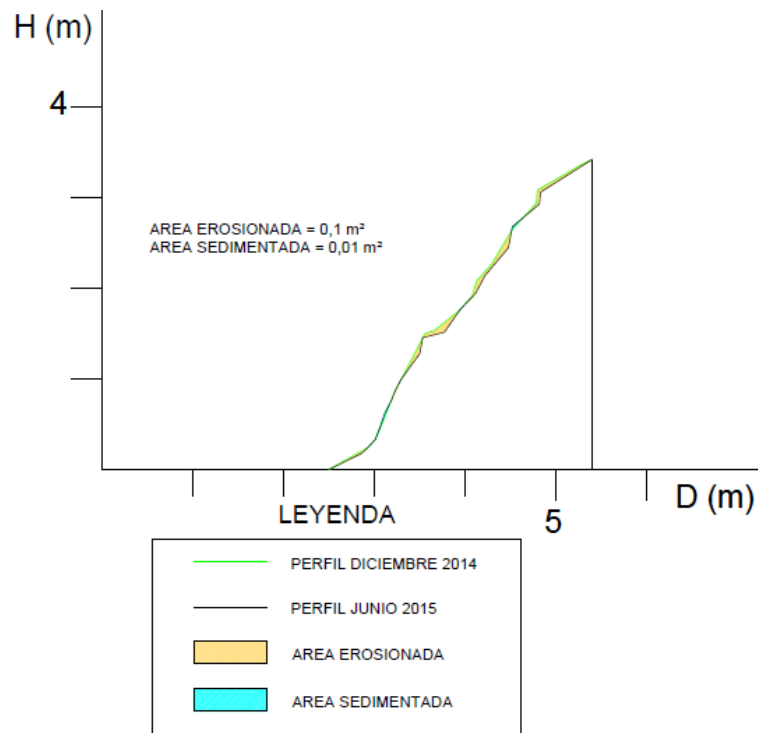


Figura 7.64. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-3.

El periodo 2-3, lo representa la Figura 7.65.

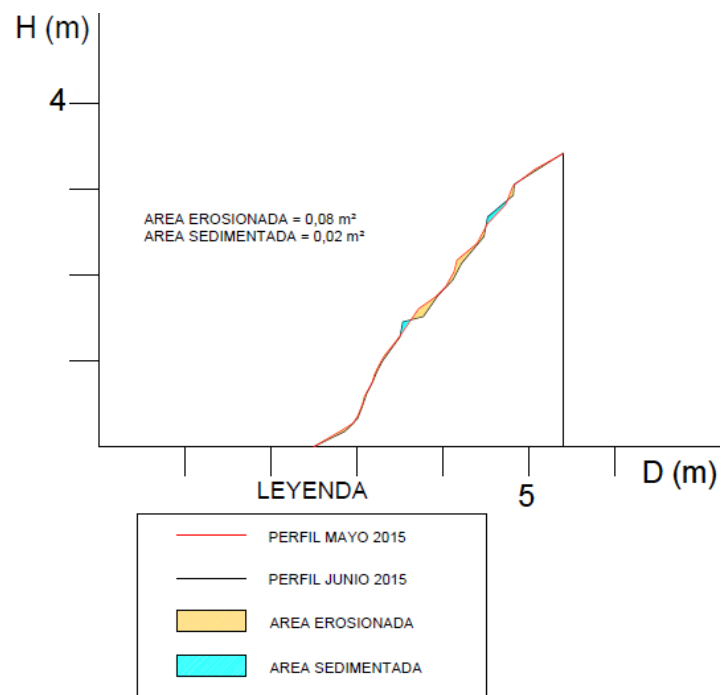


Figura 7.65. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 2-3.

Los resultados correspondientes a esta sección quedan reflejados en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14. Resultados para la sección de control 12.

Per	Pdte (%)	A.E (m²)	P.E (kg)	A.S (m²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m²)	S.Y (t/ha)
1-2	117,8	0,06	18,81	0,03	7,47	19,05	190,5
1-3	117,8	0,1	31,89	0,01	1,60	52,09	520,9
2-3	117,8	0,08	26,25	0,02	5,96	34,91	349,1

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.2.13. Sección de control 13

Los perfiles de las mediciones de Diciembre, Mayo y Junio quedan representados en las Figuras 7.66, 7.67 y 7.68 respectivamente.

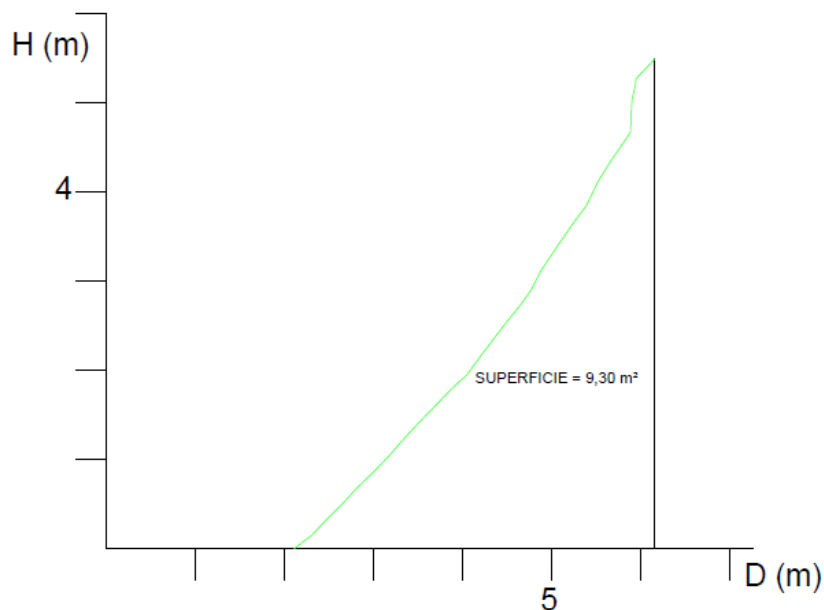


Figura 7.66. Perfil correspondiente a Diciembre de 2014.

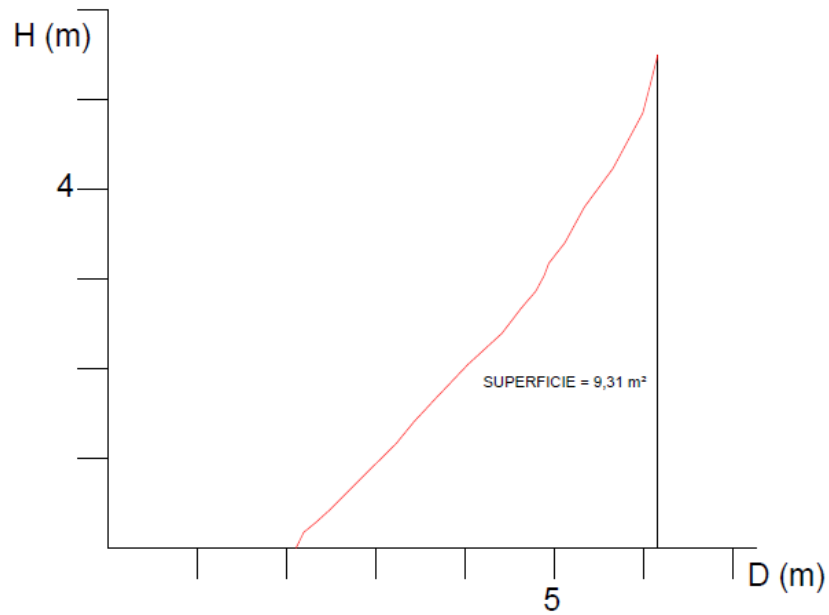


Figura 7.67. Perfil correspondiente a Mayo de 2015.

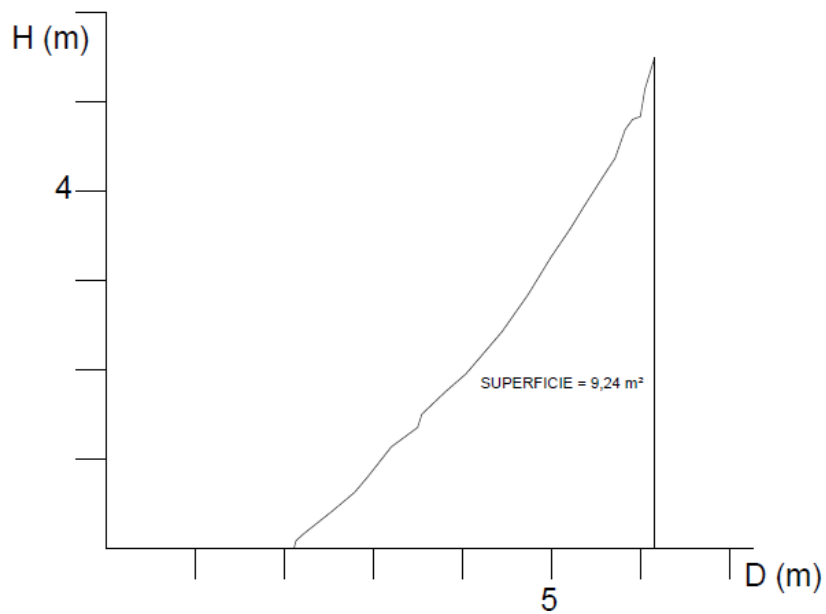


Figura 7.68. Perfil correspondiente a Junio de 2015.

A continuación se presentan las comparaciones de los perfiles anteriormente representados para los periodos de estudio, 1-2 (Figura 7.69); 1-3 (Figura 7.70) y 2-3 (Figura 7.71).

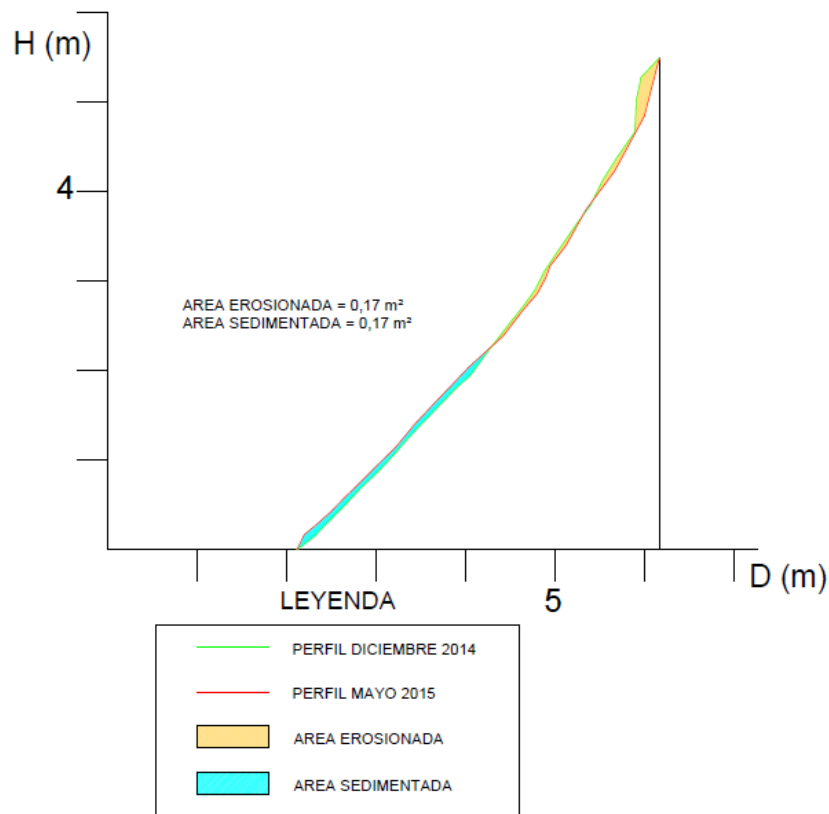


Figura 7.69. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-2.

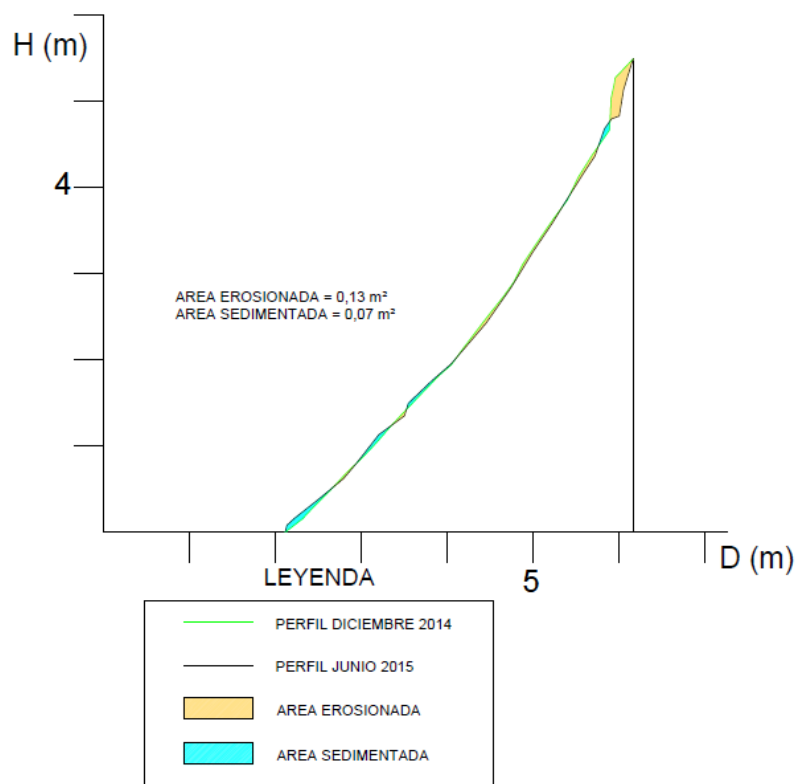


Figura 7.70. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 1-3.

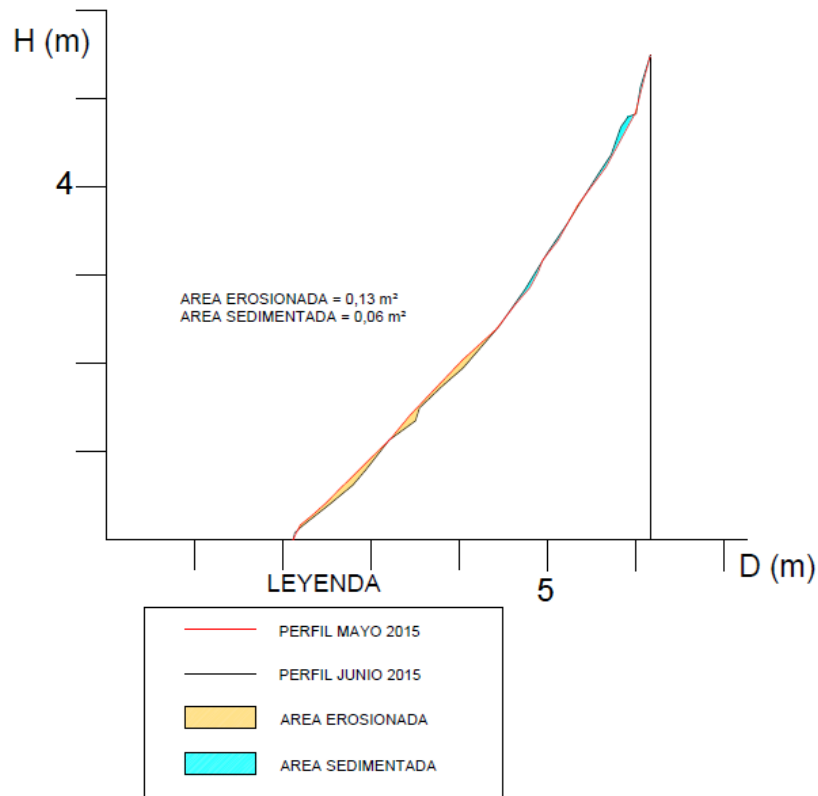


Figura 7.71. Comparación de perfiles, áreas de erosión y sedimentación para el periodo 2-3.

La Tabla 7.15 presenta los resultados obtenidos de esta sección de control.

Tabla 7.15. Resultados para la sección de control 13.

Per	Pdte (%)	A.E (m ²)	P.E (kg)	A.S (m ²)	P.S (kg)	S.Y (Kg/m ²)	S.Y (t/ha)
1-2	135,7	0,17	54,48	0,17	48,67	7,16	71,6
1-3	135,7	0,13	43,71	0,07	18,62	30,97	309,7
2-3	135,7	0,13	43,78	0,06	16,78	33,31	333,1

Per: Periodo; **Pdte:** Pendiente sección; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

7.3. Tasas erosivas en el periodo 1-2

Una vez presentados los resultados por secciones, se van a presentar englobados por periodos, para poder comparar de unos periodos a otros. Los resultados para el periodo 1-2 se muestran en la Tabla 7.16.

Tabla 7.16. Características de los perfiles, tasas erosivas, promedio, máximos y mínimos para el periodo de estudio 1-2.

Perfil	Pdte. (%)	L. (m)	A.E. (m ²)	P.E. (kg)	A.S. (m ²)	P.S (kg)	S.Y. (kg/m ²)	S.Y. (t/ha)
2	60.18	19.22	2.75	905.19	0.05	15.74	231.33	2313.32
4	75.91	24.90	1.78	587.39	2.43	522.84	12.96	129.62
6	70.15	6.09	0.24	78.83	0.06	15.90	51.68	516.77
7	87.64	12.33	1.95	724.36	0.05	11.37	289.15	2891.45
8	65.18	16.56	1.83	681.44	0.99	211.88	141.77	1417.75
9	94.29	9.82	0.89	330.20	0.07	15.11	160.42	1604.23
10	84.05	22.39	3.73	1385.55	0.02	4.36	308.42	3084.24
11	68.66	20.46	3.87	1436.83	0.61	131.58	318.91	3189.07
12	117.80	2.91	0.06	18.81	0.03	7.47	19.51	195.05
13	135.70	4.05	0.17	54.48	0.17	48.68	7.17	71.67
Promedio	85.96	13.87	1.73	620.31	0.45	98.49	154.13	1541.32
MAX	135.70	24.90	3.87	1436.83	2.43	522.84	318.91	3189.07
MIN	60.18	2.91	0.06	18.81	0.02	4.36	7.17	71.67

Pdte: Pendiente sección; **L:** Longitud; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

Las tasas obtenidas, como se puede ver en la Tabla anterior, son elevadas, esto es debido a que se ha trabajado en secciones con pendientes elevadas y longitudes de laderas considerables. Las tasas más elevadas se corresponden con las secciones de control 10 y 11 muy cercanas entre si y situadas en la cabecera de la cárcava (donde se producen los mayores procesos erosivos). Por el contrario el valor mínimo de erosión procede de la sección 13, que aunque tiene una pendiente elevada, su escasa longitud hace que no se produzca mucha pérdida de suelo. Durante este periodo de tiempo, el pluviómetro recogió 154,53 mm, prácticamente la mitad de la lluvia durante ese tiempo en un año tipo (286,35 mm), aunque la precipitación ha sido menor, ha caído de manera concentrada, haciendo que los eventos pluviométricos tengan mayor erosividad.

7.4. Tasas erosivas en el periodo 1-3

Este periodo engloba desde Diciembre a Junio, es el más largo de este estudio y para el que se tienen todas las secciones de control a excepción de la 3, que como se explicó anteriormente la colonización de la vegetación hizo imposible su medición.

En la Tabla 7.17 se pueden ver las principales características de las secciones en este periodo y las tasas de erosión calculadas.

Tabla 7.17. Características de los perfiles, tasas erosivas, promedio, máximos y mínimos para el periodo de estudio 1-3.

Perfil	Pdte. (%)	L. (m)	A.E. (m ²)	P.E. (kg)	A.S. (m ²)	P.S. (kg)	S.Y. (kg/m ²)	S.Y. (t/ha)
1	53.50	30.58	3.11	1023.81	1.98	588.32	71.20	712.04
2	60.18	19.22	2.87	944.09	0.32	95.23	220.77	2207.74
4	75.91	24.90	0.99	326.37	2.56	549.88	-44.88	-448.84
5	75.05	28.60	5.13	1689.66	0.75	160.80	267.33	2673.34
6	70.15	6.09	0.22	74.02	0.04	11.05	51.71	517.15
7	87.64	12.33	1.88	699.46	0.00	0.00	283.66	2836.61
8	65.18	16.56	1.34	498.72	2.22	476.81	6.62	66.18
9	94.29	9.82	0.98	363.42	0.02	4.17	182.91	1829.08
10	84.05	22.39	6.22	2311.84	0.11	23.63	510.97	5109.66
11	68.66	20.46	1.42	529.27	1.19	256.65	66.61	666.09
12	117.80	2.91	0.10	31.89	0.01	1.60	52.09	520.94
13	135.70	4.05	0.13	43.71	0.07	18.62	30.97	309.67
Promedio	82.34	16.49	2.03	711.35	0.77	182.23	141.66	1416.64
MAX	135.70	30.58	6.22	2311.84	2.56	588.32	510.97	5109.66
MIN	53.50	2.91	0.10	31.89	0.00	0.00	-44.88	-448.84

Pdte: Pendiente sección; **L:** Longitud; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo negativo indica que no ha habido pérdida de suelo, si no ganancia.

Para este periodo, como era de esperar en la mayoría de los perfiles estudiados la tasa erosiva ha aumentado con respecto al anterior, esto es debido, a que el periodo engloba las lluvias torrenciales de la primavera. El perfil con una mayor tasa erosiva sigue siendo el 10, situado en plena cabecera, mientras que en este caso el perfil 11, que en el otro periodo tenía unas altas pérdidas de suelo, sus mermas se han visto reducidas en gran cantidad, debido principalmente a que ha recibido suelo procedente de la parte superior de la cárcava y que no forma parte de la sección de control. En este periodo hay que destacar la sección de control 4, que como refleja la tabla su tasa de erosión es negativa, es decir, durante este periodo ha ganado terreno, lo cual nos indica que las

tormentas de esta primavera han arrastrado suelo de la parte superior de la pared lateral de la cárcava hacia la inferior que es donde esta la sección de control y que ese suelo que ha llegado no se ha perdido, si no que se ha depositado en ella, este hecho se puede observar en la Figura 7.19. Esta reducción también ocurre en la sección 8, si se observa la Figura 7.40 vemos como la mayor parte de sedimento se encuentra en la parte baja de la sección y que procede de la parte superior que es donde se producen los fenómenos erosivos coincidiendo con las mayores pendientes.

7.5. Tasas erosivas en el periodo 2-3

Este periodo es el más corto, de un mes de duración, pero en el que ocurrieron unos episodios de lluvia concentrados en una semana, donde el pluviómetro totalizador instalado en la zona recogió 51 l/m². Los resultados obtenidos en este periodo se muestran en la Tabla 7.18.

Tabla 7.18. Características de los perfiles, tasas erosivas, promedio, máximos y mínimos para el periodo de estudio 2-3.

Perfil	Pdte. (%)	L. (m)	A.E. (m ²)	P.E. (kg)	A.S. (m ²)	P.S (kg)	S.Y. (kg/m ²)	S.Y. (t/ha)
2	60.18	19.22	0.80	263.85	0.95	281.88	-4.69	-46.89
4	75.91	24.90	0.82	268.96	1.73	372.94	-20.88	-208.81
6	70.15	6.09	0.04	13.67	0.04	10.99	2.20	21.99
7	87.64	12.33	0.24	87.51	0.25	53.71	13.71	137.09
8	65.18	16.56	0.16	60.01	1.89	405.38	-104.28	-
9	94.29	9.82	0.27	99.03	0.13	27.09	36.63	1042.78
10	84.05	22.39	2.51	934.50	0.11	23.99	203.32	366.28
11	68.66	20.46	0.11	42.29	3.14	674.50	-154.47	-
12	117.80	2.91	0.08	26.25	0.02	5.96	34.91	1544.66
13	135.70	4.05	0.13	43.78	0.06	16.78	33.32	349.10
Promedio	85.96	13.87	0.52	183.98	0.83	187.32	3.98	39.77
Max	135.70	24.90	2.51	934.50	3.14	674.50	203.32	2033.20
Min	60.18	2.91	0.04	13.67	0.02	5.96	-154.47	-

Pdte: Pendiente sección; **L:** Longitud; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo negativo indica que no ha habido pérdida de suelo, si no ganancia.

En este periodo vemos como el promedio de la tasa erosiva es muy bajo, si lo comparamos con los otros dos periodos, esto puede ser debido a que el lapso de tiempo

es mucho menor que en los otros periodos. De la Tabla anterior destaca que la sección 10 sigue a la cabeza de erosión y que estas lluvias en esta sección han movido mucho suelo. En este parcial, ha habido ganancia de terreno en 4 secciones, en la 11 y la 8 que comentamos anteriormente así como en la 4 y en la 2 aunque en estas dos últimas las ganancias han sido menores. La erosión causada por estas lluvias de primavera ha sido bastante elevada en todos los perfiles, puesto que en los perfiles que ha habido pérdidas de suelo, han sido grandes. Mientras que en aquellos que ha habido ganancia de suelo es debido a que las secciones de control no llegan hasta arriba de la ladera y el suelo desprendido de esas partes altas se ha depositado sobre nuestra sección de control, aunque no se pueden considerar pérdidas de suelo porque no han salido de la cárcava de estudio.

8. Discusión

8.1. Variación de la superficie de la cárcava

Analizando los resultados del Apartado 7.1, podemos concluir que la cárcava está activa puesto que ha aumentado su superficie con una tasa de avance de 297,46 m²/año y su perímetro con una variación de 0,67 m/año, hecho que ya habíamos comprobado en campo. Este aumento no es uniforme a lo largo de toda la cárcava, ya que la erosión varía notablemente a lo largo de una cárcava produciéndose de forma no uniforme a lo largo del perímetro (Mártinez-Casasnovas y Ramos, 2009 y Luna *et al.*, 2004), produciéndose pérdidas por retroceso en la cabecera y colapso de sus paredes como consecuencia de la incisión lateral. Esto ocurre en la zona de estudio, donde las principales pérdidas se han creado en la cabecera, tal y como se puede observar en la Figura 7.4. Diferentes estudios coinciden con lo anteriormente descrito, como por ejemplo en Parapuños (Cáceres) donde Gómez Gutiérrez *et al.* (2009) estudian la evolución de una cárcava desde 1945 hasta 2006 por medio de ortofotografías aéreas, obteniendo que las mayores pérdidas por erosión se ocasionan en la cabecera.

Otras partes de las cárcavas donde se producen pérdidas importantes son zonas donde las paredes tienen pendiente elevada o son prácticamente verticales (Mártinez-Casasnovas y Ramos, 2009). Estas paredes verticales coinciden con suelo desnudo, sin vegetación que lo proteja, lo que propicia más erosión, como ocurre en nuestro caso, en el que los perfiles que son más verticales, son los que más pérdidas de suelo han experimentado y tienen ausencia de vegetación.

El análisis de variación morfológica ha deparado valores de crecimiento de 297,46 m²/año en superficie y de 0,67 m/año en perímetro. Estos valores obtenidos están muy por encima de los que obtienen Gómez Gutiérrez *et al.* (2009), que estiman el incremento del área afectada por un acarcavamiento para el periodo 1945-2006 a partir de la medición sobre ortofotografía obteniendo tasas de avance de 5,18 m²/año; o de los de Ramos (2013), que obtiene un avance medio de 19,75 m²/año para el periodo 1930-2011 en una cárcava restaurada a escasos 8 km de la zona de este trabajo. Lo que es síntoma que en la zona de estudio los procesos de erosión han sido muy notables y continúan siéndolo. Por otro lado el avance de la cárcava de la zona de estudio es de la misma magnitud que el obtenido por Martínez-Casasnovas y Ramos (2009) en el Alt Penedès (Barcelona) para el periodo 1975-1995 ya que obtienen avances de 230 m²/año

en cárcavas muy parecidas a la de este trabajo con grandes pendientes y escasa cobertura vegetal.

En cuanto al avance lineal, la tasa obtenida en la cárcava de Villantodrigo es de 0,67 m/año, valor superior al que Vicente *et al.* (2009) estiman para un sistema de cárcavas en Guadarrama (Segovia) donde a través de diferentes técnicas, obtienen tasas de 0,29 m/año con máximos de 0,78 m/año, sin embargo, si es de la misma magnitud que los valores que Luna *et al.* (2004) estiman en Guadix (Granada) ya que sus tasas de retroceso para un sistema de cinco cárcavas van desde los 0,21 hasta 1,71 m/año situándose la media en 0,57 m/año.

Analizando los resultados obtenidos por otros autores sus tasas de avance por lo general son inferiores a la de este trabajo, esto puede ser debido a la diferencia de cálculo de dichas tasas, a que son zonas con pendientes inferiores o también que la tasa obtenida este año, en este trabajo, es mayor a la normal, ya que como hemos señalado durante la pasada primavera se produjeron precipitaciones con carácter torrencial, según los datos del pluviómetro colocado en la zona de estudio (en menos de un mes se recogieron 51,12 l/m²), por lo que esas lluvias han podido sobredimensionar las tasas de avance de este año.

En lo que sí coinciden todos los autores citados anteriormente, así como este trabajo es en que las mayores tasas de retroceso se producen en paredes laterales verticales y en la cabecera de la cárcava. También coinciden en que las tasas de retroceso así como las de erosión aumentan cuanto menor sea la cubierta vegetal.

8.2. Tasas erosivas estimadas a través de las secciones de control

Consideramos los resultados como suficientemente significativos, aunque en erosión hablar de un periodo de escasamente 7 meses no es un lapso de tiempo muy grande, debido a eso se decidió instalar las secciones de control en aquellos lugares donde los procesos erosivos iban a ser importantes.

El distanciómetro láser es un instrumento que cuenta con una precisión y alcance elevado, puesto que es capaz de medir con errores inferiores a 0,1 mm. Por su buena precisión estos equipos son utilizados en obras de ingeniería muy precisas como la construcción de edificios, estimaciones de áreas, volúmenes, peritajes y para el levantamiento de perfiles, aunque con fin de estudiar la erosión, como se ha hecho en

este estudio, no se ha realizado en muchas ocasiones, por lo que los valores obtenidos con él han sido aceptados.

Como se observó en campo los procesos erosivos que ocurren en esta cárcava tienen una magnitud considerable y son realmente importantes pudiendo llegar a mover hasta varias centenas de toneladas de suelo. Si eliminamos de los resultados la sección de control 10, situada en la cabecera y que debido a la actividad de la cárcava, su fuerte pendiente y que los valores pueden verse afectados por la actividad agrícola que se desarrolla en el páramo da valores muy altos, descontando los valores obtenidos en la sección 10, la tasa erosiva media se mueve alrededor de las 1100 t/ha, pero no es uniforme a lo largo de toda la cárcava, ya que se produjo principalmente en las paredes verticales sin vegetación (Martínez-Casasnovas y Ramos, 2009 y Romero *et al.*, 2011). Martínez-Casasnovas y Ramos obtienen tasas de 600 t/ha y año, si bien es cierto que la pendiente media de su zona de estudio es menor. Navarro *et al.* (2002) en taludes del ferrocarril obtiene tasas máximas de más de 1090 t/ha y año, un valor muy alto y de magnitud un poco menor al obtenido en este estudio, si bien ambos trabajos coinciden en que las tasas pueden ser tan altas por el relieve acentuado y el suelo desnudo en el que se encuentran las zonas donde se han realizado las mediciones y en ambos casos ha habido un evento pluviométrico de altas magnitudes. Por lo general, otros trabajos dan tasas erosivas menores a la de este, por citar algunos ejemplos en Bardenas Reales (Navarra) obtienen una tasa media de 32 t/ha y año en el periodo 1993-2004 (Desir y Marín, 2009); López-Vicente y Navas (2009) en la cárcava “La Coloma” estiman pérdidas de 33 t/ha y año con una pendiente media del 27%; Bartolomé (2013) en una zona cercana a la de este estudio, estima en una cárcava restaurada, la erosión previa a la restauración que allí había, obteniendo tasas superiores a 105 t/ha y año en suelos desnudos, mientras que en el año 2011 esos suelos desnudos arrojaban tasas mayores de 120 t/ha y año (después de dos restauraciones), en una zona con pendiente media del 50% e inferior al 80% de nuestra zona de estudio.

A nivel nacional la erosión varía de un lugar a otro al igual que dentro de la cárcava las tasas de erosión cambian de una sección de control a otra, lo que puede ser debido a las diferentes pendientes, longitudes, exposición al sol..., a parte de esos factores hay que tener en cuenta que la erosión no solo fluye de un lugar a otro, también hay variaciones anuales, mensuales (Gómez Gutiérrez *et al.*, 2009) derivados de la variabilidad de los

procesos de lluvia así como del estado de la superficie del suelo (Rodríguez *et al.*, 2002).

Además en muchas investigaciones las tasas de erosión engloban el conjunto de la cárcava mientras que en este estudio la totalidad de las secciones están ubicadas en paredes con pendientes superiores al 50% y sin vegetación que como señalan muchos autores en los suelos desnudos es donde se dan los mayores procesos erosivos (Martínez-Casasnovas y Ramos, 2009; Romero *et al.*, 2011; Cerdà y Navarro, 1996; Rubio-Delgado *et al.*, 2014; Durán *et al.*, 2014). El efecto de la vegetación, como freno de las pérdidas de suelo se muestra en la Figura 8.1 donde una pequeña planta sujeta el terreno que alrededor de ella se ha ido como consecuencia de la erosión.



Figura 8.1. Vegetación sujetando el terreno dentro de la zona de estudio.

Otro de los motivos por los que las tasas pueden ser tan altas, son por los procesos de *pipping* y *pop corn* que se forman en las partes altas de las paredes de la cárcava. Las formaciones arcillosas son fácilmente degradadas por procesos de meteorización, debido al lavado de sales, humectación y secado, hinchamiento y contracción debido a la presencia de arcillas hinchables y altos contenidos de sodio. Los amplios periodos secos seguidos de eventos de lluvia favorecen el desarrollo de grietas, *pop corn*. En épocas secas el agrietamiento alcanza su máximo facilitando la infiltración (Desir y Marín, 2009). A través de esas grietas penetra el agua de escorrentía, haciéndolas cada vez más profundas hasta que al final se saturan y caen ladera abajo, no solo provocando

erosión también el aumento del área de la cárcava y su perímetro. Lo descrito anteriormente se puede observar en la Figura 8.2.



Foto 8.2. Izda: *Pipping* en la cabecera de la cárcava. Dcha: *Pop corn* en parte alta de las paredes.

Es necesario la realización de más trabajos, utilizando la misma metodología que en este estudio para poder discutir los resultados obtenidos en otros lugares. Debido a que como hemos señalado anteriormente la variabilidad de la erosión es muy grande de unos lugares a otros. Pocos autores miden erosión con pendientes tan elevadas como las de este estudio; además las tasas erosivas se calculan con diferentes métodos de ahí las posibles diferencias entre sus tasas y las de este trabajo.

9. Conclusiones

9.1. Respecto a la metodología aplicada

- El empleo del distanciómetro láser es un buen método para medir erosión en zonas con altas pendientes y difícil acceso, puesto que de esta manera no se causan interferencias en las medidas al no transitar por la zona estudiada.
- Las secciones de control son más precisas, rápidas y sencillas de medir cuanto más cortas sean, recomendando longitudes inferiores a 15 metros.
- Las secciones deben instalarse en suelos desnudos puesto que la vegetación resta precisión a la medida.
- Las mediciones se deben realizar a primera hora de la mañana o a última de la tarde puesto que es cuando mejor se ve el punto rojo emitido por el láser lo que facilita hacer puntería a los clavos.
- Es necesario poner los clavos en lugares que no vayan a ser tapados por la vegetación, arrastrados por la erosión, sustraídos y deben ser marcados con un spray de alta duración y visibilidad para facilitar su identificación en futuras mediciones.

9.2. Respecto a los resultados del estudio

- La superficie de la cuenca y el perímetro han aumentado, siendo más notable ese crecimiento en las paredes laterales verticales de la cárcava, así como en la cabecera de la misma y poniendo de manifiesto que la cárcava esta activa.
- Los análisis edafológicos señalaron texturas arcillosas en los suelos de la zona de estudio, la textura arcillosa se caracteriza por su impermeabilidad, lo que favorece la aparición de escorrentía y como consecuencia la erosión.
- El pluviómetro totalizador ha recogido en total para el periodo de estudio 205,7 l/m², siendo la precipitación normal en la zona durante este lapso de tiempo de 347,9 l/m², por lo tanto estamos ante un año con menos precipitación de la normal, por lo que los eventos de lluvia han tenido una capacidad erosiva muy importante.
- Para los periodos largos de estudio, los procesos erosivos han deparado tasas de pérdidas de suelo inadmisibles tanto desde el punto de vista de la formación como de la conservación de suelo.

- En la parte alta de la mayoría de las secciones es donde se producen la mayor parte de los procesos erosivos coincidiendo con la altas pendientes, parte de ese material se deposita en las zonas bajas del perfil donde la pendiente es más suave y otra parte sale fuera de la sección al cauce principal y de allí fuera de la cárcava.
- Las lluvias intensas de la primavera han supuesto un movimiento de material importante, gran parte de él ha pasado de las partes altas de las laderas a las bajas, pero no se ha perdido en su totalidad de ahí las algunas tasas negativas de erosión en el periodo de estudio 2-3.
- La pendiente y la vegetación juegan un papel importante en la erosión, a medida que aumenta la pendiente, el agua de escorrentía alcanza más velocidad y su poder erosivo aumenta, mientras que la vegetación es capaz de frenar la erosión ya que protege el suelo, en nuestra zona de estudio tenemos la peor combinación alta pendiente más suelo desnudo y por ello las tasas erosivas son tan altas.

10. **Bibliografía**

- Allué, J.L. (1990). Atlas fitoclimático de España. Taxonomías. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Almorox, J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz, M. y Gasco, J.M. (1994). Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Española. Madrid
- Almorox, J. López- Bermúdez, F. y Rafaelli, S. (2010). La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. Universidad de Murcia. Murcia.
- Arribas, J.J. (2013). Variaciones en la generación de escorrentía y caudales, en la cárcava nº 11, en Lobera de la Vega (Palencia) tras las restauraciones hidrológico-forestales del siglo XX. Ingeniero Técnico Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- 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, (Archivo de la Confederación Hidrográfica del Duero). Valladolid.
- Azcarretazábal, D. (1963). Proyecto de repoblación forestal, restauración de laderas y consolidación de márgenes en el río Carrión. Memoria y presupuesto. Servicio Forestal de la Confederación Sindical Hidrográfica del Duero, (Archivo de la Confederación Hidrográfica del Duero). Valladolid.
- Barreda, P.M. (2003). La conducción de aguas a Palencia en el siglo XVIII; enfrentamiento del Concejo y el Cabildo. Publicaciones de la Inst. Tello Téllez de Meneses 74: 5-47.
- Bartolomé, D. (2012). Variaciones en la producción y emisión de sedimentos en la cárcava nº 11 de Lobera de la Vega (Palencia) tras las restauraciones hidrológico-forestales del siglo XX. Ingeniero Técnico Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Bartolomé, D., Navarro, J., Arribas, J.J., Ramos, I., Mongil, J. (2013). Evolución en la producción y emisión de sedimentos 81 años tras la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). Actas del VI Congreso Forestal Español. Vitoria.
- BOE (2015). Boletín Oficial del Estado. [Web en línea]. Disponible desde: www.boe.es [Consulta en: 10-1-2015].

- Campano, A. (2012). Estudio de infiltración en una cárcava restaurada en Saldaña (Palencia). Ingeniero Técnico Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Casali, J., López, J.J., y Giráldez, J. V. (1999). Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra (España): descripción y cuantificación. *Ingeniería Del Agua*, 6, 251–258.
- Ceñal, M.A., Glaria, G., Blanco A. y Bermejo, M.A. (1988). Análisis del medio físico de Palencia. Delimitación de unidades y estructura territorial. Junta de Castilla y León, Epypsa. Valladolid.
- Cerda, A. y Navarro, R. (1996). Tasas de erosión en una solana de la Serra Grossa. *La Costera. Cuadernos de Geografía*, 59: 27-46. Valencia.
- C.E. (2000). Directiva 2000/60/CE, de 23 de Octubre de 2000, por lo que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* núm L.32, de 22 de Diciembre de 2000.
- CHD (2011). Anejo 14: atlas de mapas. Mapa 1: ámbito territorial de la demarcación hidrográfica internacional del Duero. [Publicación en línea]. Disponible desde: <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico2009/PropuestaPlanHidrol%C3%B3gico/Anejo14Atlasdemapas/tabid/501/Default.aspx> [Consulta en: 12-4-2015].
- Dantín, J. y Revenga, A. (1941). Las líneas y las zonas isoxeras de España, según los índices termoplumiométricos. Avance al estudio de la aridez en España. *Estudios Geográficos*, 2: 35-91.
- De Alba, S., Benito, G., y Pérez, A. (2002). Parcelas experimentales para el estudio de la erosión hídrica. Finca experimental La Higuera. *Cuadernos Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 13: 45-53.
- Desir, G., y Marín, C. (2009). Caracterización de la erosión en áreas acarcavadas de la FM.Tudela (Bárdenas Reales, Navarra). *Cuaderno de Investigación Geográfica*, 35(2): 195–213.
- Díaz, V., Mongil, J., Navarro, J. y Ramos, I. (2012). Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales. [Publicación en línea]. Disponible desde: <http://www.conama11.es/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896706011.pdf> [Consulta en: 26-4-2015].

- Durán Zuazo, V.H., Martínez-Raya, A., Aguilar, J. (2002). Control de la erosión en los taludes de bancales, en terrenos con fuertes pendientes. *Edafología*, 9: 1–10.
- Durán Zuazo, V.H., Rodríguez, C.R., Cuadros, S. y Francia, J. R. (2014). Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea / Impact of soil erosion and runoff on mountain slopes of Mediterranean agroecosystems. *Ecosistemas*, 23(1): 66-72.
- Emberguer, L. (1932). Sur une formule climatique et ses applications en botanique. *La météorologie*, 423-432.
- FAO (1998). Word Reference Base for Soil Resources. FAO. Roma.
- Feliú, A. y Gueorguieva, I. (2003). La degradación y desertificación de los suelos en España. Fundación Gas Natural.
- Francis, C. (1985). Hydrological investigation of soils in relation to gully head development in South East Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica X*: 55-63.
- Fournier, F. (1960). *Climat et érosion*. Ed. Presses Universitaires de France. París.
- Galicia, S. (en preparación). Proyecto de restauración hidrológico forestal de la cárcava nº 1 del Alto de los Castañales en la localidad de Villantodrigo (Palencia). Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Gandullo, J.M. (1985). *Ecología vegetal*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- Gandullo, J.M. y Serrada, R. (1977). Mapa de productividad potencial de la España peninsular. INIA. Madrid.
- Gerlach, T. y Macar, P. (1967). Hillslope troughs for measuring sediment movement, in Tricart, J. Field methods for the study of slope and fluvial processes. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, spc. num. Cong. New-Dehli 1968: 173.
- Gómez Gutiérrez, A., Schnabel, S., y Sanjosé Blasco, J.J. (2009). Variación temporal de la erosión por cárcavas en los fondos de valle bajo explotación de dehesa. *Cuaderno de Investigación Geográfica*, 35, 289–304.
- Gómez Gutiérrez, A., Schnabel, S. y Lavado Contador, F. (2011). Procesos, factores y consecuencias de la erosión en cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 55: 59- 80.

- González-Garrido, J. (1941). La Tierra de Campos. Región Natural. Ámbito. Diputación de Palencia. Palencia.
- Gorezynski, W. (1920). Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la Climatologie. *Annuaire de Géographie* (pp. 52- 68).
- Hudson, N.W. (1993). Field measurement of soil erosion and runoff. Fao. 139 p. Rome.
- Ibañez, J.J. y Jiménez, R. (2003). Grandes Retos Medioambientales en la sociedad del Siglo XX. Erosión y Desertificación con énfasis en la región Mediterránea. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid
- ICONA (1980-1990). Mapa de Estados Erosivos. Cuencas Hidrográficas del Ebro, Guadiana, Guadalquivir, Júcar, Pirineo, Segura, Sur de España, Tajo... ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- ICONA (1988). Agresividad de la lluvia en España: valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- IGME (1982). Mapa geológico de España. Escala 1.50000. Hoja 164 (Saldaña). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid
- IGN (2011). Mapa topográfico Nacional de España a escala 1:25000 de la hoja nº 164- III (Saldaña). Instituto Geográfico Nacional. Madrid
- IGN (2011). Mapa topográfico Nacional de España a escala 1:50000 de la hoja nº 164- III (Saldaña). Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IGN (2011). Modelo digital del terreno malla 5 metros de la hoja nº 164- III (Saldaña). Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IGN (2011). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- Lang, R. (1920). *Verwitterung und Bodenbildung als Einführung in die Bodenkunde*. Stuttgart.
- López-Bermúdez, F., García-Ruiz, J.M., Romero-Díaz, M.A., Ruiz-Flaño, P., Martínez-Fernández, J. y Lasanta, T. (1993). Medidas de flujos de agua y sedimentos en parcelas experimentales. Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño.
- López-Vicente, M. y Navas, A. (2009). Escorrentía y pérdida de suelo en cárcavas: modelización en un agrosistema del prepirineo oscense. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35(2), 239-261.

- Luna, E., Laguna, A. M., Poesen, J. y Giráldez, J.V. (2004). Evolución de un sistema de cárcavas activas en el sureste español. *Ingeniería Del Agua*, 11, 65-73.
- MAGRAMA (2007). Red RESEL. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. [Web en línea]. Disponible desde: http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_resel.aspx [Consulta: 14-2-2015].
- MAGRAMA (2013). Inventario Nacional de Erosión en Suelos. Anuario de Estadística. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. [Publicación en línea]. Disponible desde: http://www.magrama.gob.es/estadistica/pags/anuario/2013/AE_2013_12_07_05.pdf [Consulta: 6-3-2015].
- MAGRAMA (2015). GeoPortal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. [Web en línea]. Disponible desde: <http://sig.magrama.es/geoportal/> [Consulta: 8-3-2015]
- MAPA (1977). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. [Web en línea]. Disponible desde: <http://sig.magrama.es/geoportal/> [Consulta: 8-3-2015].
- Martínez-Casasnovas, J.A. y Concepción, M. (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.
- Martínez de Azagra, A. y Navarro Hevía, J. (1996). *Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valladolid. Valladolid.
- Martínez de Azagra, A., Fernández, R., Seseña, A., Méndez, C., Díez, J.M., Navarro, J. y 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.
- Martonne, E. (1906). L'indice d'aridité de l'Association Géographique de France, X, 3-5.
- MOPU (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Ministerio de Obras Públicas. Madrid.

- Moreno Brotons, J. (2007). Erosión eólica e hídrica en estériles de minería en el campo de Cartagena. PFC Ciencias Ambientales. Murcia.
- Morgan, R.P.C. (2001). A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model. *Catena*, 44: 305-322.
- Navarro, J., San Martín, R., Jonte, M. A., Fernández, R. y Bengoa, J. L. (2002). Evaluación de la erosión potencial y real en desmontes de infraestructura viaria de Palencia. *Cuadernos Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 13, 119-124.
- Navarro, J. (2009). Apuntes de hidrología forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Navarro, J., Mongil, J. y De Araújo, J.C. (2013). Desertificación secular de las cuestas de Saldaña (Palencia) frente a 80 años de restauración. *Cuadernos Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 38, 115-122.
- Navarro, J., De Araújo, J.C. y Mongil, J. (2014). Assessment of 80 years of ancient badlands restoration in Saldaña, Spain. *Earth surface processes and landforms*. DOI: 10.1002/esp.3541.
- NRCS (2003). Field Book for Describing and Sampling Soils. Lincoln.NB: NRCS-USDA. [Publicación en línea]. Disponible desde <http://www.soils.usda.gov> [Consulta en: 10-4-2015].
- PAND (2008). Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. Convenio de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. [Publicación en línea]. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/descarga_pand.aspx [Consulta en: 15-4-2015].
- Paterson, S.S. (1956). The forest area of the world and its potential productivity. Royal University of Göteborg. Göteborg.
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Valdés, R., Olivares, C. y Balocchi, F. (2010). Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. *Aqua-LAC*, 2, 1–11.
- RAE (2014). Diccionario de la Lengua Española. Real Academia Española. [Web en línea]. [Consulta: 21-12-2014].

- Ramos, I. (2012). Control de sedimentos y evaluación morfológica de la cárcava nº 20 de Saldaña (Palencia) como consecuencia de su restauración hidrológico-forestal. Ingeniero Técnico Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- 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). Máster Ingeniero Montes. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- Rawls, W.J. y Brakensiek, D.L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In Morel- Seytoux (Ed.) Unsaturated flow in hydrologic modeling theory and practice (pp 275- 300). Dordrecht (Netherlands): Kluwer Academic Publishers.
- Rivas-Martínez, S. (1987). Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España. ICONA. Madrid.
- Rivas-Martínez, S. (2007). Mapa de series, geoserias y geopermaseries de vegetación de España (Memoria del Mapa de Vegetación Potencial de España. Parte 1). *Itinera Geobotánica*, 17: 5- 436.
- Rivas-Martínez, S. (2011). Mapa de series, geoserias y geopermaseries de vegetación de España (Memoria del mapa de Vegetación Potencial de España. Parte 1). *Itinera Geobotánica*, 18: 5-800.
- Rodríguez, A., Arbelo, C.D., Guerra, J.A. y Mora, J.L. (2002). Erosión hídrica en andosoles de las Islas Canarias. *Edafología*, 9(1), 23-30.
- Romero Díaz, A., Martínez Lloris, M., Alonso Sarriá, F., Belmonte Serrato, F., Marín Sanleandro, P., Ortíz Silla, R., Rodríguez Estrella, T. y Sanchez Toribio, M.J. (2007). Los diques de corrección hidrológica. Cuenca del Río Quípar (Sureste de España). Editum, Universidad de Murcia. Murcia.
- Romero Díaz, A., Ruiz Sinoga, J.D. y Belmonte Serrato, F. (2011). Tasas de erosión hídrica en la Región de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 129–153.
- Rubio-Delgado, J., Schnabel, S., Gómez Gutiérrez, A. y Berenguer, F. (2014). Estimación de tasas de erosión históricas en dehesas utilizando raíces arbóreas expuestas y láser escáner terrestre. *Cuaternario y Geomorfología*, 28 (3-4): 69-84.

- Sancho, C., Benito, G. y Gutiérrez, M. (1991). Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño.
- SigPac (2015). Visor. Sistema de Identificación Geográfica de Parcelas Agrícolas. [Web en línea]. Disponible desde: <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/> [Consulta:14-2-2015]
- Sirvent, J., Desir, G., Gutiérrez, M., Sancho, C. y Benito, G. (1997). Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin , NE-Spain). *Geomorphology*, 18, 61-75.
- Thorntwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *The Geogr. Rev.* 38: 55-94.
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration, potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. *Annales Agronomiques*, 12, 13- 49.
- UNEP (1997). *World Atlas of Desertification*. (2nd ed). Oxford University Press.
- USDA (2003). *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. (Rev Ed.). USDA. Washington DC.
- Valentin, C., Poesen, J. y Yong, L. (2005). Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63: 132- 153.
- Vera, J.A. (1989). Normas e instrucciones complementarias para la realización del trabajo práctico de Climatología. UPM. ETSI Agrónomos. Madrid.
- Vicente, F., Sanz, M. A., Lucía, A. y 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. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural sección Geología*, 103 (1-4), 49-64.
- Walter, H. y Lieth, H. (1960). *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena: VEB Gustav Fisher Verlag.
- Wischmeier, W.H. (1959). A rainfall erosion index for universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 23: 246-249.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA. Agriculture Handbook 537. Washington DC.

11. Anejos

11.1. Climatología

11.1.1. Estaciones meteorológicas

Para poder efectuar el estudio del clima de la zona de estudio, se ha elegido la estación situada en el municipio de Saldaña (2370) debido a su cercanía (8 km de la zona de estudio) y su situación similar. Los datos de la estación meteorológica elegida se pueden ver a continuación:

- 2370: estación de 2º orden perteneciente a la red meteorológica nacional.
 - Municipio: Saldaña
 - Provincia: Palencia
 - Altitud: 912 m
 - Latitud: 42° 31' 25''
 - Longitud: 04° 44' 07''
 - Orientación: Sur
 - Período: 1952 / 2014

11.1.2. Serie de precipitaciones

La serie de precipitaciones utilizadas para el estudio, va desde el año 1952 hasta 2014 (Tabla 11.1), como conocemos de otros estudios anteriores (Bartolomé, 2012 y Arribas, 2013) la estación de Saldaña tiene un error sistemático en la toma de datos, para corregir ese error se recurre a la fórmula propuesta por Bartolomé (2012); fórmula que ya ha sido utilizada en otros estudios de la misma zona para corregir los datos.

Tabla 11.1. Serie de datos de precipitaciones para la zona de estudio.

Año	P.anual (mm)	P. Max diaria (mm)	Mes PMAX diaria	D Lluvia	D nieve
1952	590.6	38.2	Julio	55	8
1953	393.3	35	Junio	33?	2?
1954	349.4	38	Noviembre	43	7
1955	729	45.5	Agosto	72	22
1956	439	22	Marzo	48	4
1957	254	17	Marzo	33	4
1958	526.5	35	Junio	44	0
1959	661.3	35.5	Noviembre	59	3
1960	696	40	Octubre	74	6
1961	738.5	40	Noviembre	20?	3?

Tabla 11.1 (cont). Serie de datos de precipitaciones para la zona de estudio.

Año	P.anual (mm)	P. Max diaria (mm)	Mes PMAX diaria	D Lluvia	D nieve
1962	390.7	54	Enero	14?	2?
1963	637.3	28	Noviembre	34?	0?
1964	353.5	30	Enero y Mayo	31	0
1965	383.1	31.5	Septiembre	0?	0?
1966	841.5	58	Octubre	59?	9
1967	475.9	37.5	Mayo	33	11
1968	535.6	25.6	Octubre	53	4
1969	658.8	42	Junio	52	12
1970	497.4	42.5	Enero	44	6
1971	724.7	46.5	Octubre	62	10
1972	747	31.5	Enero	60	8
1973	500.5	35	Mayo	46	5
1974	585.2	43.5	Julio	58	6
1975	392	19	Febrero	51	3
1976	508.2	26.5	Junio	76?	10?
1977	671.6	39	Diciembre	78	14
1978	692.8	29.3	Diciembre	76	9
1979	676.7	29	Julio	85	9
1980	372.7	29.6	Abril	80	8
1981	431.6	30	Febrero	85	17
1982	483.7	48	Septiembre	77	6
1983	497.3	45	Diciembre	85	8
1984	680.6	52.3	Octubre	99	10
1985	623.1	58.3	Diciembre	90	8
1986	366.3	65.6	Septiembre	55	13
1987	546.8	60	Septiembre	66	13
1988	577.6	49	Junio	80	3
1989	533.9	40.3	Diciembre	94	4
1990	384.6	45.9	Junio	71	4
1991	348.4	34	Septiembre	66	8
1992	483.6	35	Junio	76	6
1993	524.6	61	Septiembre	93	8
1994	450.1	24.2	Enero	75?	8?
1995	504.4	44.5	Noviembre	88?	3?
1996	617.8	36.5	Enero	106	11
1997	714.3	63.2	Julio	125	6
1998	403.2	37.5	Agosto	94	8
1999	445.8	32.8	Septiembre	91?	9?
2000	690.3	38.6	Noviembre	122?	7?
2001	474.7	40	Marzo	40?	6?

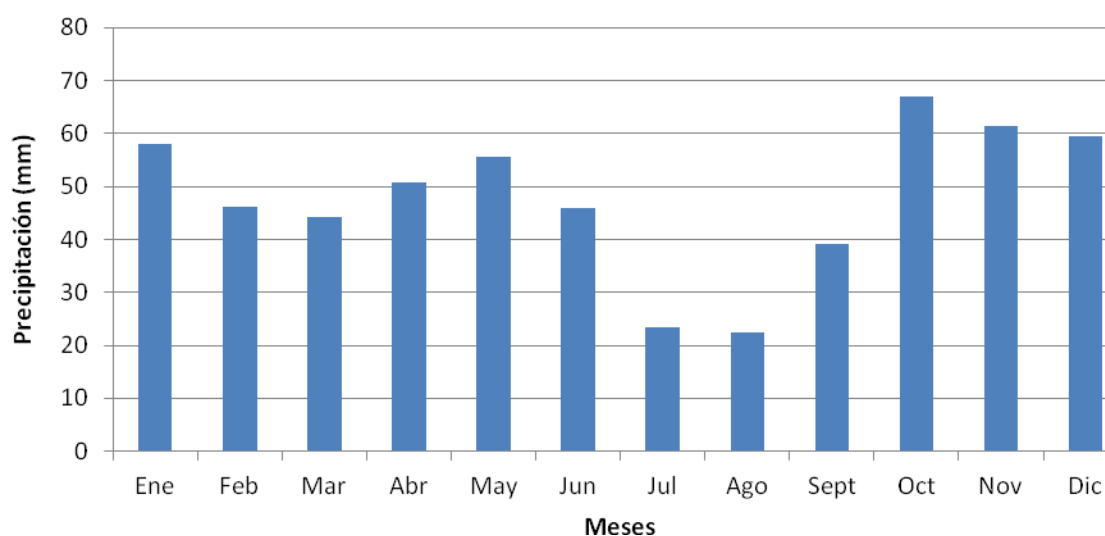
Tabla 11.1 (cont). Serie de datos de precipitaciones para la zona de estudio.

Año	P.anual (mm)	P. Max diaria (mm)	Mes PMAX diaria	D Lluvia	D nieve
2002	572.7	39	Septiembre	87?	6?
2003	582.3	41	Octubre	56?	6?
2004	406.8	78	Septiembre	24?	9?
2005	387.0	29	Octubre	49?	10?
2006	602.8	40	Octubre	51?	1?
2007	370.5	31	Mayo	43?	4?
2008	374.6	21.7	Abril	38?	0?
2009	319.3	35.2	Octubre	34?	6?
2010	591.5	40.3	Junio	52?	8?
2011	421.4	31.5	Noviembre	34?	3?
2012	338.9	43.2	Octubre	42?	6?
2013	612.6	42.4	Enero	82?	10?
2014	555.2	39.5	Abril	56?	5?

Como resumen de la tabla anterior, en la Tabla 11.2, se muestran los datos obtenidos para la precipitación media mensual y anual y su distribución gráfica en la Figura 11.1.

Tabla 11.2. Precipitaciones medias mensuales.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
P. media (mm)	57,9	46,2	44,2	50,7	55,7	45,9	23,4	22,5	39,2	67,0	61,5	59,5
Precipitación media anual (mm)	573,7											

**Figura 11.1.** Distribución anual de las precipitaciones medias.

11.1.3. Serie de temperaturas

La serie de temperaturas abarca el periodo de años 1997–2014, en la Tabla 11.3 se pueden ver los datos de temperaturas mensuales y la media.

Tabla 11.3. Datos de temperaturas mensuales.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	MEDIA
tm (°C)	2,9	4,2	7,4	9,4	13,2	17,3	19,7	19,9	16,5	11,6	6,2	3,2	10,9
T (°C)	7	9,7	13,6	15,7	20,1	24,8	27,7	27,6	23,6	17,4	10,7	6,9	17,1
t (°C)	-1,2	-1,4	1,1	3,2	6,5	9,9	11,7	12,2	9,4	5,9	1,6	-1	4,8
Ta (°C)	19	20	24,5	29	33,5	37	36	37	35	28,5	25	16,5	37
Año	2013	2000	2002	2011	2001	2012	2011	2012	2006	2011	1997	2008	2012
T'a	13,9	16,3	20,2	241	289	325	345	346	30,6	241	181	134	35,2
ta (°C)	11,5	-11	-10,5	-4,5	-2,5	1	2,5	3	-0,5	-4	-9	-16	-16
Año	2010	2012	2005	2009	2004	1998	2009	2010	2005	2010	2001	2009	2009
t'a	-7,2	-6,1	-5,3	-2,7	-3	4	5,5	5,9	2,8	-5	-4,2	-6,9	-9,1

tm: temperatura media anual; **T:** temperatura media de las máximas anuales; **t:** temperatura media de las mínimas anuales; **Ta:** Temperatura máxima absoluta; **T'a:** temperatura media de las máximas absolutas; **ta:** temperatura mínima absoluta; **t'a:** temperatura media de las mínimas absolutas

11.1.4. Clasificaciones climáticas

11.1.4.1. Índices pluviométricos

- Índice de Irregularidad Pluviométrica

Es el cociente entre la máxima precipitación anual de la serie observada de datos y el valor mínimo. En zonas de Europa de clima oceánico este índice no supera en tres veces el registro de menor precipitación anual, siendo mayor que tres en zonas mediterráneas de gran irregularidad pluviométrica.

$$I.I. = \frac{\text{max. valor pluv.}}{\text{min. valor pluv.}} = \frac{841,5}{254} = 3,3$$

El valor obtenido nos indica que estamos en una zona con cierta irregularidad pluviométrica.

- Índice de Erosividad de la Lluvia. Factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE, 1959)

La erosividad de la lluvia se define como el producto de la energía cinética de un aguacero por la intensidad máxima durante 30 minutos.

Para calcular el factor R anual se calcula el producto de la energía cinética de los aguaceros durante ese año por la intensidad máxima del aguacero respectivo durante 30

minutos. El Índice de Agresividad de la lluvia medio para una determinada zona, se obtiene a través de la media de los valores de los R, anuales de la serie.

$$R_i = \sum_{j=1}^n E_j \times I_{j30}$$

Donde:

- R_i = factor de agresividad de la lluvia del año "i".
- E_j = energía cinética del aguacero "j" del año "i".
- I_{j30} = intensidad máxima en 30 minutos del aguacero "j" del año "i".
- n = número de aguaceros que se han producido en el año "i".

El Índice de Agresividad de la lluvia medio, para una zona concreta, se obtiene a través de la media de los valores de los R_i anuales de la serie:

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{N}$$

Para el cálculo del R interanual, ICONA (1988) divide la Península Ibérica en 3 zonas (Figura 11.2) para cada cual le corresponde una expresión matemática.

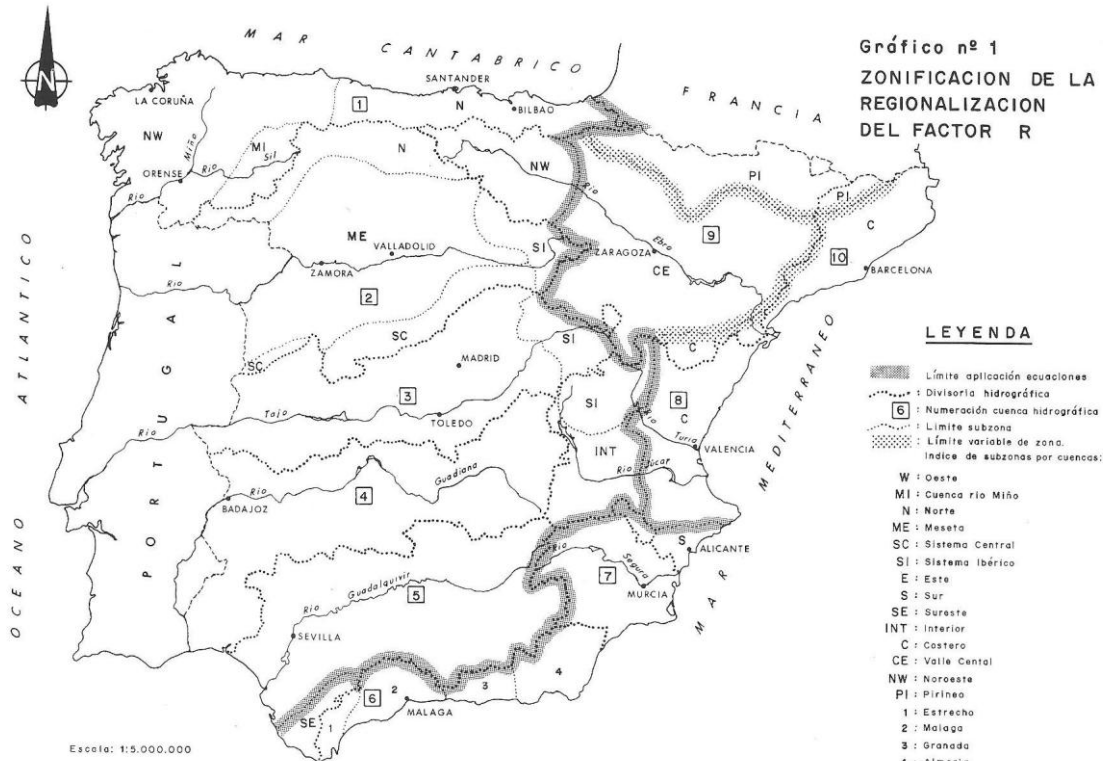


Figura 11.2. Mapa zonificación de la regionalización del factor R (ICONA, 1988).

Para nuestra zona la expresión a utilizar es:

$$R = e^{-0,834} \times (\text{PMEX})^{1,314} \times (\text{MR})^{-0,388} \times (\text{F24})^{0,563}$$

Donde:

- PMEX = Valor medio anual de la máxima lluvia mensual (Tabla 11.1).
- PMEX = 124,5 mm.
- MR = Precipitación media del periodo octubre-mayo (Tabla 11.2).
- MR = 442,85 mm.
- F24 = Valor medio de los cocientes entre la lluvia máxima en veinticuatro horas de cada año, elevada al cuadrado, y la suma de las máximas en veinticuatro horas de todos los meses de ese mismo año (Tabla 11.4).
- F24 = 8,22.

$$F24_i = \frac{(\text{Pmax, d})^2}{\sum_1^{12} P_{j \text{ max, d}}} \quad F24 = \sum_1^N \frac{R_i}{N} = 8,10$$

Con lo que el factor R será:

$$R = e^{-0,834} \times (124,5)^{1,314} \times (442,5)^{-0,388} \times (8,22)^{0,563} = 75,71 \text{ hJ x cm x m}^{-2} \text{ x h}^{-1}$$

El valor de R interanual calculado mediante esta expresión para nuestra serie de datos es de 75,71 siendo un valor de erosividad de la lluvia bajo a moderado, ya que en España varía entre 30 y 300 aproximadamente.

Tabla 11.4. Cálculo del valor medio de los cocientes entre la lluvia máxima en veinticuatro horas (F24).

Año	Pmax24,d	(Pmax24,d) ²	∑Pjmax,d	F24 _i
1952	38,2	1459,24	221,4	6,59
1953	35	1225	181	6,77
1954	38	1444	151	9,56
1955	45,5	2070,25	242,5	8,54
1956	22	484	146,5	3,30
1957	17	289	98	2,95
1958	35	1225	219	5,59
1959	35,5	1260,25	220,5	5,72
1960	40	1600	219	7,31
1961	40	1600	207	7,73
1962	54	2916	142	20,54

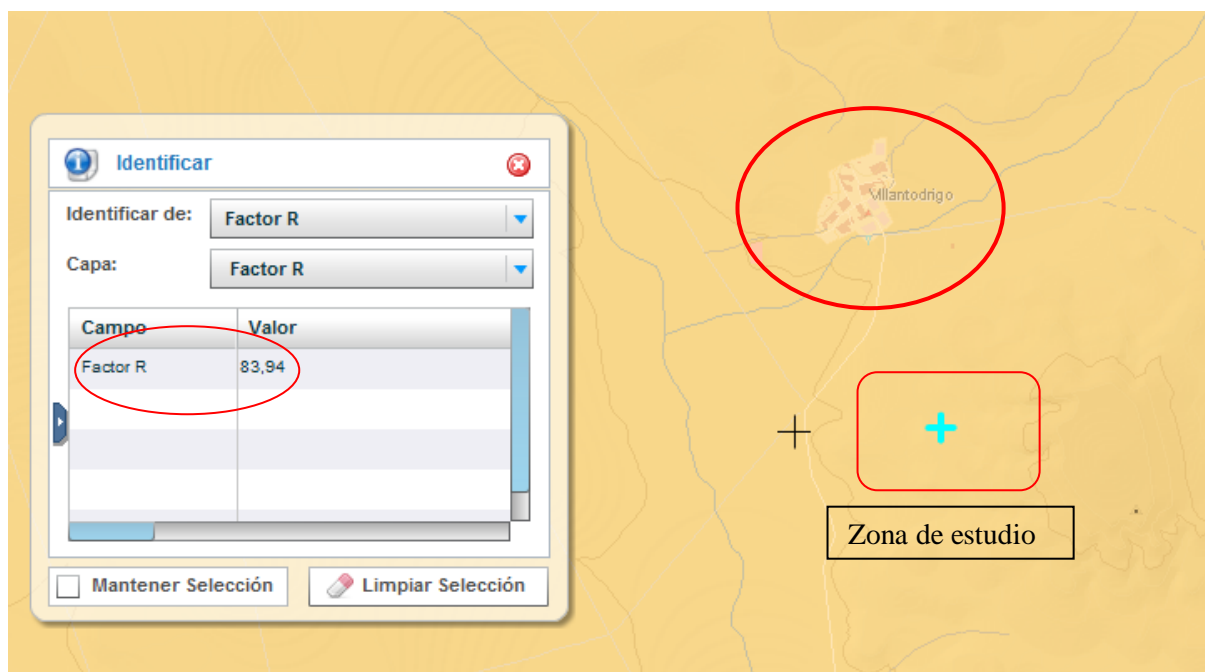
Tabla 11.4 (cont). Cálculo del valor medio de los cocientes entre la lluvia máxima en veinticuatro horas (F24).

Año	Pmax24,d	(Pmax24,d) ²	ΣPjmax,d	F24 _i
1963	28	784	203,4	3,85
1964	30	900	137	6,57
1965	31,5	992,25	134	7,40
1966	58	3364	268,5	12,53
1967	37,5	1406,25	231,9	6,06
1968	25,6	655,36	209,6	3,13
1969	42	1764	223,2	7,90
1970	42,5	1806,25	149,5	12,08
1971	46,5	2162,25	224,2	9,64
1972	31,5	992,25	234	4,24
1973	35	1225	199	6,16
1974	43,5	1892,25	211,5	8,95
1975	19	361	161	2,24
1976	26,5	702,25	168	4,18
1977	39	1521	189	8,05
1978	29,3	858,49	202,3	4,24
1979	29	841	177,7	4,73
1980	29,6	876,16	141,7	6,18
1981	30	900	199,3	4,52
1982	48	2304	204,4	11,27
1983	45	2025	197	10,28
1984	52,3	2735,29	264,9	10,33
1985	58,3	3398,89	246,7	13,78
1986	65,6	4303,36	162,4	26,50
1987	60	3600	252,2	14,27
1988	49	2401	264,7	9,07
1989	40,3	1624,09	219,6	7,40
1990	45,9	2106,81	205,6	10,25
1991	34	1156	159,2	7,26
1992	35	1225	226,7	5,40
1993	61	3721	242,1	15,37
1994	24,2	585,64	158,6	3,69
1995	44,5	1980,25	153,3	12,92
1996	36,5	1332,25	225,2	5,92
1997	63,2	3994,24	273,1	14,63
1998	37,5	1406,25	220,3	6,38
1999	32,8	1075,84	165,9	6,48
2000	38,6	1489,96	225,4	6,61
2001	40	1600	226,4	7,07
2002	39	1521	230,5	6,60
2003	41	1681	247,8	6,78

Tabla 11.4 (cont). Cálculo del valor medio de los cocientes entre la lluvia máxima en veinticuatro horas (F24).

Año	Pmax24,d	(Pmax24,d) ²	ΣPjmax,d	F24 _i
2004	78	6084	244,2	24,91
2005	29	841	173,9	4,84
2006	40	1600	231,1	6,92
2007	31	961	200,4	4,80
2008	21,7	470,89	176,9	2,66
2009	35,2	1239,04	160,6	7,72
2010	40,3	1624,09	189,2	8,58
2011	31,5	992,25	185,8	5,34
2012	43,2	1866,24	162,8	11,46
2013	42,4	1797,76	223,7	8,04
2014	39,5	1560,25	229,1	6,81
Promedio				8,22

Comparamos el valor obtenido con el que ofrece el MAGRAMA en su geoportal, donde tiene un visor que permite obtener de forma aproximada el Factor R para la cualquier zona de España. Para nuestra zona de estudio, la imagen del visor, así como el Factor R, se presenta en la Figura 11.3.

**Figura 11.3.** Factor R de la zona de estudio. (Geoportal, MAGRAMA, 2015).

Como se ve en la figura anterior, el Factor R obtenido a través del geoportal, aunque la serie de datos usada por el MAGRAMA es más corta y probablemente no ha sido

corregida por dobles acumulaciones, y el calculado mediante la fórmula son del mismo orden de magnitud, por lo que aceptamos el resultado calculado a través de la fórmula.

- Índice de Agresividad del Clima (Fournier, 1960)

Este índice se determina año a año mediante la siguiente fórmula (Tabla 11.5).

$$F_i = \frac{p_{ji}^2}{P_i}$$

Donde:

- p_{ji} = precipitación del mes más lluvioso (j) del año “i” (mm).
- P_i = precipitación total del año “i” (mm).

Tabla 11.5. Valores del Índice de Agresividad Climática.

Año	F _i	Año	F _i
1952	14,64	1983	25,12
1953	14,65	1984	44,69
1954	19,95	1985	27,74
1955	16,15	1986	44,06
1956	41,21	1987	22,36
1957	15,38	1988	21,50
1958	18,99	1989	31,63
1959	15,58	1990	13,62
1960	52,69	1991	15,04
1961	32,11	1992	20,06
1962	46,65	1993	18,66
1963	29,67	1994	25,34
1964	26,34	1995	31,09
1965	11,03	1996	42,06
1966	30,08	1997	23,48
1967	21,01	1998	15,44
1968	20,98	1999	36,05
1969	25,06	2000	36,69
1970	97,31	2001	45,46
1971	27,24	2002	27,16
1972	16,11	2003	38,72
1973	43,76	2004	17,29
1974	14,21	2005	47,87
1975	7,17	2006	38,01
1976	17,95	2008	42,11
1977	36,80	2009	21,11
1978	49,61	2010	28,39
1979	25,05	2011	14,51
1980	13,63	2012	24,97
1981	18,56	2013	22,65
1982	26,03	2014	20,77

El índice de Agresividad del Clima medio de Fournier (1960), se obtiene a través de la media de los valores anuales:

$$F = \sum_{1952}^{2014} \frac{F_i}{n} = 27,89$$

El índice de Agresividad Climática de Fournier medio vale 27,89.

En el mapa de isolíneas del Factor de Fournier nos encontramos entre la isolínea 20 y 30. Este parámetro, en la cuenca del Duero tiene un rango de variación entre 20 y 100. En los rebordes montañosos de la cuenca y en la cabecera de los ríos de la margen derecha esta cifra adquiere valores superiores a 80. La isolínea de 40 domina el 80% de la cuenca. Por lo que nos encontraríamos en los valores más bajos de la cuenca.

11.1.4.2. Índices climáticos

- Índice de pluviosidad (Lang, 1920)

Explica de forma sencilla el grado de aridez teniendo en cuenta la precipitación y la energía disponible para evaporar.

$$I = \frac{P}{T} = \frac{573,7}{10,9} = 52,6$$

Donde:

- P = Precipitación media anual = 573,7 mm.
- T = Temperatura media anual = 10,9 °C.

Según el índice estaríamos en una zona húmeda de estepa o sabana.

- Índice de aridez (UNEP, 1997)

Se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$I = \frac{P}{ETP} = \frac{573,7}{665,67} = 0,86$$

Donde:

- P = Precipitación media anual = 573,7 mm.
- ETP = Evapotranspiración potencial = 665,67 mm.

En la Tabla 11.6, se muestran los valores que puede tomar este índice así como su clasificación.

Tabla 11.6. Clasificación de los valores del índice.

Valor	Clasificación	Riesgo de desertificación
> 0,65	Húmedo	Sin riesgo
0,65 – 0,5	Subhúmedo – seco	
0,5 – 0,2	Semiárido	Con riesgo
0,2 – 0,05	Árido	
< 0,05	Hiperárido	

El valor del índice es 0,86 por lo que la zona de estudio se clasifica como húmeda y sin riesgo de desertificación.

- Índice de aridez (Martonne, 1906)

Este índice es ampliamente usado para definir el grado de aridez en los climas desfavorables para el crecimiento de especies arbóreas:

$$I_a = \frac{P}{T + 10} = \frac{573,7}{10,9 + 10} = 27,45$$

Donde:

- P = precipitación media anual = 573,7 mm.
- T = T^a media anual = 10,9 °C.

En la Tabla 11.7, presentamos la interpretación de este índice con sus valores y clasificación.

Tabla 11.7. Valores y clasificación para el índice de Martonne.

Valor	Clasificación
< 5	Desiertos
5 – 10	Semidesierto
10 – 20	Semiárido tipo mediterráneo
20 – 30	Subhúmedas
30 – 60	Húmedas
> 60	Perhúmeda

- Índice de Emberger (1932)

La fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$Q = \frac{100 \times P}{(M - m) \times (M + m)} = \frac{100 \times 573,7}{(27,7 - (-1,4)) \times (27,7 + (-1,4))} = 74,97$$

Donde:

- P = Precipitación media anual = 573,7 mm.
- M = Media de las máximas del mes más cálido = 27,7 °C.
- m = Media de las mínimas del mes más frío = - 1,4 °C.

Para poder interpretar este índice, se necesita la Figura 11.4. En ella se introduce el valor de “Q” y de “m”, para quedar definida la subregión climática

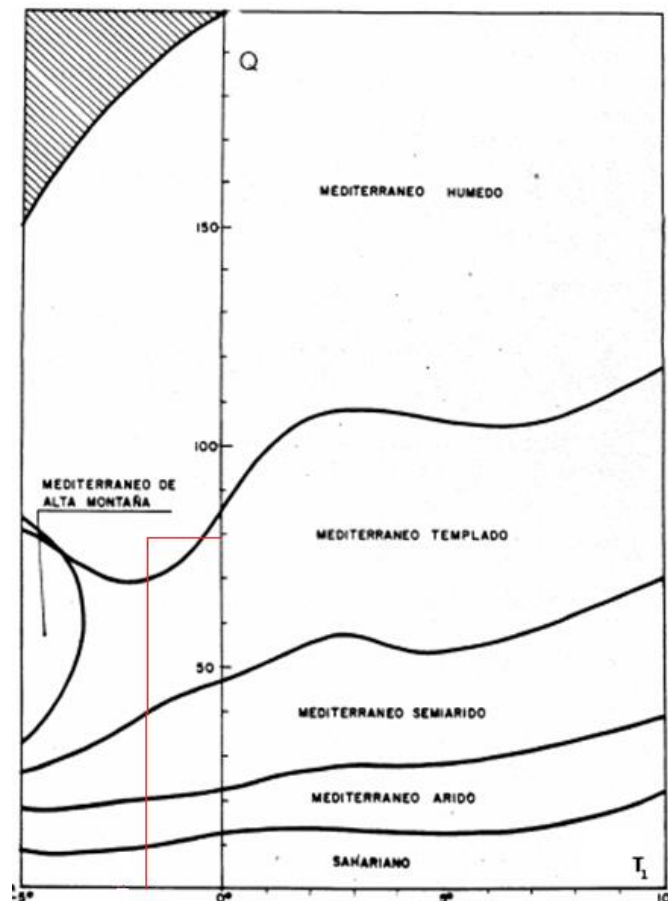


Figura 11.4. Clasificación del índice (Emberger, 1932). Fuente: Vera, 1989.

Según este índice nos encontramos en el piso mediterráneo húmedo, de invierno frío ($m > -3^{\circ}\text{C}$) con heladas muy frecuentes.

- Índice (Dantín-Revenga, 1941)

Su fórmula es la siguiente:

$$I = 100 \times \frac{T}{P} = 100 \times \frac{10,9}{573,7} = 1,90$$

Donde:

- T = T^a media anual = 10,9 °C.
- P = Precipitación media anual = 573,7 mm.

Según los parámetros de clasificación del índice, nos encontramos en una zona húmeda.

- Índice de continentalidad (Gorezynski, 1920)

La expresión utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$I_g = 1,7 \times \left(\frac{A}{\text{sen } L} \right) - 20,4 = 22,53$$

Donde:

- A = amplitud térmica anual = 17 °C.
- L = latitud = 42,31°.

El resultado del índice nos sitúa en un clima continental.

- Índice de Productividad Potencial Forestal (IPPF) (Gandullo-Serrada, 1977)

Este índice, basado en el índice de Paterson (1956), para climas predominantemente mediterráneos, trata de evaluar la productividad potencial de un bosque en una zona y para unas condiciones determinadas. Y su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$I = \frac{V \times f \times P \times G}{A \times 12} = 161,37$$

Donde:

- V = temperatura media mensual del mes más cálido = 19,9 °C.
- f = factor de insolación:

$$f = \frac{2.500}{n + 1000} = 0,705$$

$$n = \text{n}^\circ \text{ de horas de insolacion} = \frac{76.330,2}{30} = 2.544,34$$

- P = precipitación media anual en mm = 573,7 mm.
- G = duración del período vegetativo, expresado en meses, considerando como mes activo para la vegetación forestal aquél en el que la media mensual, expresada en mm iguala o supera el doble de la temperatura media mensual (°C), siempre que ésta sea > 6° C. = 7 meses.
- A = Rango anual de temperaturas, estimado por la diferencia entre la media de las máximas del mes más cálido y la media de las mínimas del mes más frío = 29,1 °C.

$$\text{Producción} = 5,3 \times (\log_{10} I - \log_{10} 25) = 4,29 \text{ m}^3 / \text{ha} \times \text{año}$$

El Índice de Gandullo-Serrada (*Índice de Productividad Potencial Forestal, IPPF*) se calcula como la Producción según Paterson multiplicada por un coeficiente “K” que depende de la litofacies y viene reflejado en el “*Mapa de Productividad Potencial Forestal de la España Peninsular (1977)*”. En nuestro caso K = 1,66 (aluviones calizos).

$$\text{IPPF} = K \times \text{Producción} = 7,12 \text{ m}^3 / \text{ha} \times \text{año}$$

Clase III: Tierras que tienen limitaciones moderadas para el crecimiento de bosques productivos.

- Evapotranspiración potencial (Thornthwaite, 1948)

Se basa en la utilización de la temperatura media mensual y la latitud del lugar.

$$ETP = K \times 16 \times \left(10 \times \frac{t}{I}\right)^a$$

Donde:

- ETP = evapotranspiración potencial (mm/mes).
- K = coeficiente de corrección que depende del número de días del mes y de las horas efectivas de luz solar en dicho mes. Este valor viene tabulado en función de la latitud del lugar.
- t = temperatura media mensual (° C).
- I = índice de calor anual. Suma de los doce valores del índice térmico mensual (i):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

$$I = \sum_1^{12} i$$

$$a = 675 \times 10^{-9} \times (I)^3 - 77,1 \times 10^{-6} \times (I)^2 + 0,01792 \times (I) + 0,49329$$

Los cálculos para la determinación de la ETP se muestran en las Tablas 11.8 y 11.9.

Tabla 11.8. Cálculo de la ETP.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Tª media mes	2.86	4.19	7.37	9.42	13.17	17.30	19.71	19.89	16.52	11.59	6.16	3.17
t/5	0.572	0.839	1.473	1.884	2.634	3.460	3.941	3.978	3.303	2.319	1.233	0.634
(t/5)^{1,514}	0.429	0.766	1.798	2.608	4.334	6.549	7.976	8.088	6.105	3.573	1.373	0.502
I=	44.101											
a=	1.192											

Tabla 11.9. Cálculo de la ETP.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Tª media mes	2,86	4,19	7,37	9,42	13,17	17,30	19,71	19,89	16,52	11,59	6,16	3,17
10*T	28,6	41,9	73,7	94,2	131,7	173,0	197,1	198,9	165,2	115,9	61,6	31,7
(10*t)/I	0,64	0,951	1,670	2,135	2,986	3,923	4,468	4,510	3,745	2,629	1,398	0,719
(10*t/I)^a	0,59	0,942	1,843	2,469	3,683	5,097	5,952	6,018	4,823	3,164	1,490	0,675
K	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
16*K	13,1	13,28	16,48	17,9	20,16	20,32	20,48	19,04	16,64	15,2	13,12	12,64
ETP(mm)	7,83	12,51	30,37	44,25	74,24	103,5	121,9	114,5	80,25	48,09	19,56	8,53
ETP anual	665,67											

Con todos los cálculos realizados se determina que la ETP anual es de 665,67 mm.

- Clasificación climática (Turc, 1961)

Calcula la evapotranspiración real o déficit de escorrentía.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 \times \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}} = 671,72 \text{ mm}$$

Donde:

- ETR = evapotranspiración real anual = D = déficit de escorrentía (mm).
- P = precipitación media anual = 573,7 mm.
- $L = 300 + 25 \times t + 0,05 \times t^3 = 300 + 25 \times (10,9) + 0,05 \times (10,9)^3 = 637,25$.
- $t = t^a$ media anual = 10,9 °C.

Comparando el valor de P con $P_1 = 0,316 \times L = 201,37$ y con $P_2 = 0,632 \times L = 402,74$ se clasifica el clima como:

- Clima húmedo si $P > P_1$
- Semiárido si $P_2 < P < P_1$
- Árido si $P_2 > P$

Por lo que la zona de estudio se encuentra en un clima húmedo.

- Índice de Mediterraneidad (Rivas Martínez, 1987)

Se utiliza para separar las regiones Eurosiberiana y Saharoarábica mediante los siguientes índices:

$$I_{m1} = \frac{ETP_{julio}}{P_{julio}} = \frac{121,9}{23,4} = 5,20 \Rightarrow I_{m1} > 4$$

$$I_{m2} = \frac{ETP_{julio+agosto}}{P_{julio+agosto}} = \frac{121,9 + 114,58}{23,4 + 22,5} = 5,15 \Rightarrow I_{m2} > 3,5$$

$$I_{m3} = \frac{ETP_{junio+julio+agosto}}{P_{junio+julio+agosto}} = \frac{121,9 + 114,58 + 103,56}{23,4 + 22,5 + 45,9} = 3,77 \Rightarrow I_{m3} > 2,5$$

Donde:

- ETP = evapotranspiración media mensual = 618,59 mm.
- P = precipitación media mensual = 665,67 mm.

Estas condiciones nos indican que estamos en la región mediterránea.

- Índice Hídrico Anual

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_h = \frac{(100 \times S - 60 \times D)}{ETP} = \frac{100 \times 215,86 - 60 \times 307,69}{665,67} = 4,69$$

Donde:

- S = Superávit (Existe superávit en los meses en los que $P > ETP$) = 215,86 mm.
- D = Déficit (Existe déficit en los meses en los que $P < ETP$) = 307,69 mm.
- ETP = Evapotranspiración potencial = 665,67 mm.

Tabla 11.10. Cálculo del índice hídrico anual.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
P. media (mm)	57,9	46,2	44,2	50,7	55,7	45,9	23,4	22,5	39,2	67	61,5	59,5
ETP (mm)	7,83	12,51	30,37	44,25	74,24	103,5	121,9	114,5	80,25	48,09	19,56	8,53
Superavit (mm)	50,07	33,69	13,83	6,45	0	0	0	0	0	18,91	41,94	50,97
Déficit (mm)	0	0	0	0	18,54	57,6	98,5	92	41,05	0	0	0

Según el valor que toma este índice, nos encontramos en una zona subhúmeda

- Climodiagrama (Walter y Lieth, 1960)

Comparación adimensional entre evapotranspiración y precipitaciones (Figura 11.5) de la que se deducen los siguientes parámetros:

- Intervalo de sequía: meses en los que la precipitación está por debajo de la temperatura.
- Intervalo de sequedad.
- Área húmeda: Superficie entre las curvas, cuando la curva de precipitación queda por encima de la de temperaturas.
- Período de helada segura (Hs): meses en los que la temperatura media de las mínimas es menor de 0 °C.
- Período de helada probable (Hp): meses en los que la temperatura media de las mínimas es superior a 0 °C, pero la mínima absoluta es inferior a 0 °C.

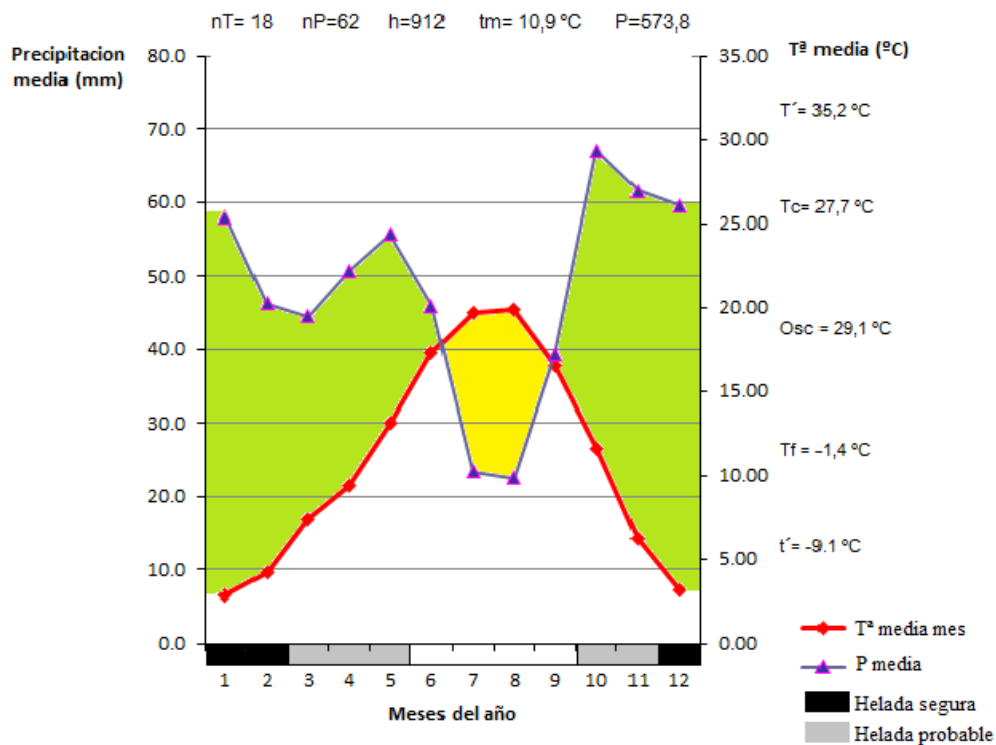


Figura 11.5. Climodiagrama (Walter y Lieth, 1960).

Donde:

- T' : T^a media anual de máximas absolutas anuales.
- Tc = T^a media de la máximas del mes más cálido.
- Osc = Oscilación ($Tc - Tf$).
- Tf = T^a media de las mínimas del mes más frío.
- t' = T^a media anual de las mínimas absolutas anuales.
- nT = Número de años de a serie de temperaturas.
- nP = Número de años de la serie de precipitaciones.
- h = Altitud (m).
- tm = T^a media anual.
- Hs = período de helada segura.
- Hp = período de helada probable.
- Área verde = Periodo húmedo.
- Área amarilla = Periodo seco.

11.1.4.3. Índices fitoclimáticos

- Clasificación climática (Allué, 1990)

Su utilidad reside en la facilitación de un rápido acercamiento inicial a los tipos fitológicos y a las corologías fitoclimáticas de la Tierra. La base fitológica procede del Mapa Mundial de Vegetación de C. Troll y K.H. Paffen. La base climática se toma a partir de los climodiagramas de H. Walter y H. Lieth.

Para su clasificación, Allué selecciona una serie de factores de reconocida trascendencia para la vida vegetal, ordenados de acuerdo con su importancia en España desde el punto de vista caracterizador. Los poderes caracterizadores resultan del cálculo gráfico del número de intersecciones que cada uno de los valores posibles de todos los valores climáticos producía en el conjunto de los ámbitos, correspondiente a cada valor climático.

Según la clasificación fitoclimática de Allué (1990), Villantodrigo se encuentra en el subtipo VI (IV)₁ cerca de los límites del VI (IV)₁, siendo ambos nemoromediterráneos genuinos. El subtipo VI (IV)₁ puede existir en diferentes litologías predominando los grupos planicaducifolios marcescentes.

La serie a la que pertenece Saldaña es la del roble melojo (*Quercus pyrenaica*) llamada *Luzulo forseteri* - *Querceto pyrenaicae sigmetum* subhúmeda de las alisedas.

11.2. Edafología

11.2.1. Clasificación de los suelos de la zona de estudio

Según el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos (Saldaña), E. 1:50.000, (MAPA, 1977) y según la clasificación americana de suelos (Soil taxonomy, 7ª aproximación, 1975) los suelos de la vega del Río Carrión, pertenecen al orden de los *entisoles* suborden *orthent*.

Los suelos desnudos de las cárcavas se podrían incluir dentro del orden de los *entisoles*, suborden *orthents* (NRCS, 2003) o *leptosoles* (FAO, 1998). Estos se caracterizan por no poseer horizontes de diagnóstico definidos, procedentes de una roca madre joven incoherente, en fuertes pendientes y sometidos a procesos de erosión y aporte.

Sobre la roca madre apenas se diferencia un horizonte superficial, que no es más que la regolita, generada por los ciclos de helada y soleamiento, que desaparece con rapidez debido a los fuertes procesos erosivos dejando al descubierto la matriz arcilloarenosa (Navarro *et al.*, 2012).

11.2.2. Elección del lugar y toma de muestras

Para poder determinar las propiedades físicas y químicas del suelo, una vez explorada la zona de estudio, se decidió la apertura de dos calicatas, con objeto de obtener muestras alteradas así como inalteradas del terreno. Las muestras alteradas se llevaron al Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (ITAGRA), para su análisis y emisión del posterior informe con todas las propiedades interesantes para este trabajo (clasificación USDA, contenido de nutrientes y cuantificación de parámetros físico-químicos). Las muestras inalteradas, que se toman con ayuda de cilindros y una maza para poderlos introducir en el terreno; nos sirven para hallar la densidad aparente. En la Figura 11.6, se observa la recogida de muestras alteradas e inalteradas en zona de estudio. También en diversos puntos se realizaron diversos test de resistencia a la penetración y de esfuerzo cortante.



Figura 11.6. Toma de muestra alterada (izda) e inalterada mediante cilindro de muestreo (dcha).

Como se citó anteriormente, se optó por realizar una calicata en cada lugar representativo de la cárcava. El primero de ellos situado en la parte más baja de la cuenca, a priori, con unas características más similares a la roca madre. Mientras que el segundo se realizó en la parte más alta, en suelos con tonalidades rojizas muy diferentes a las observadas en el resto de la cárcava. A continuación se describirán más detalladamente los lugares de muestreo.

- Muestra 1: Parte baja de la cuenca

Realizada sobre terreno desnudo, en una zona con pendiente elevada, de orientación sur, con escasa pedregosidad. Es un suelo poco profundo, de reciente formación y donde no se distinguen horizontes. Como se señaló anteriormente, también se tomaron muestras inalteradas del terreno, en este punto de muestreo se decidieron coger tres muestras inalteradas, ya que son suficientes para poder tener buenos resultados de densidad aparente.

- Muestra 2: Parte alta de la cuenca

Realizada sobre terreno desnudo, con pendiente elevada, escasa pedregosidad, orientación sur y con un color de terreno mucho más rojizo que el otro punto de muestreo. Suelo poco profundo, de reciente creación y donde como en el caso anterior no se diferencian horizontes. Se tomo una muestra alterada y dos inalteradas, empleándose la misma metodología que en el caso anterior.

- Resto de muestras inalteradas

A parte de las anteriormente citadas, se tomaron otras muestras en puntos cercanos a las secciones de control de erosión, para poder conocer en detalle el suelo de esas zonas de estudio. En total se tomaron 9 muestras repartidas por algunas de las secciones que están establecidas.

11.2.3. Características físicas del suelo

- Densidad aparente

Para calcular la densidad aparente de las distintas muestras se utilizó el método de los cilindros, que consiste en introducir en el suelo con la ayuda de un martillo, un cilindro de dimensiones conocidas intentando que quede completamente lleno y que no se deforme la muestra. Esa muestra una vez llevada al laboratorio, se seca en la estufa durante 24 horas a 100° C. Posteriormente se pesa la muestra descontando el peso del cilindro y como el volumen también se conoce, se calcula la densidad (densidad = masa/volumen).

A continuación se muestran algunas fotografías de cómo se realizó este análisis en el laboratorio (Figura 11.7). Los resultados se muestran en la Tabla 11.11.



Figura 11.7. Procedimiento de laboratorio para la determinación de la densidad aparente. a) Pesado de muestras en balanza; b) Secado de las muestras en estufa; c) Muestras inalteradas tras todo el proceso.

Tabla 11.11. Cálculos de la densidad aparente de las muestras inalteradas (Ph: Peso húmedo; Ps: Peso seco; Pv: Peso vidrio; Pc: Peso cilindro; Pm: Peso de la muestra seca; Vc: Volumen del cilindro; Y: Densidad aparente; YM: Densidad aparente media).

Nº	Muestra	Ph (g)	Ps (g)	Pv (g)	Pc (g)	Pm (g)	Vc (cm ³)	Y (g/cm ³)	YM (g/cm ³)
1	1	316	311,4	16,7	113,785	180,915	98,52	1,836	
2	1	308,4	304,4	16,1	113,785	174,515	98,52	1,771	
3	1	307	303,9	20	113,785	170,115	98,52	1,727	1,732
4	2	326,9	323	24	113,785	185,215	98,52	1,880	
5	2	283,9	281,3	25,3	113,785	142,215	98,52	1,444	
6	T. arriba	255,3	252,3	25,8	113,785	112,715	98,52	1,144	
7	T. arriba	240,9	238,9	21,2	113,785	103,915	98,52	1,055	1,075
8	T. arriba	242,4	239,8	25	113,785	101,015	98,52	1,025	
9	Pluviómetro	286,8	284,5	21,5	113,785	149,215	98,52	1,515	
10	Pluviómetro	282,2	279,4	22,9	113,785	142,715	98,52	1,449	1,482
11	S. cierre arriba	278,7	276,2	22,3	113,785	140,115	98,52	1,422	
12	S. cierre arriba	277,6	274,7	22,2	113,785	138,715	98,52	1,408	1,415
13	S. cierre abajo	272,2	270,3	22,3	113,785	134,215	98,52	1,362	
14	S. cierre abajo	279,7	276,8	22,4	113,785	140,615	98,52	1,427	1,395

- Textura

La textura se debe al tamaño de los elementos que integran el suelo. Es la cantidad de arena, limo y arcilla existente en el suelo. La importancia de su estudio está en la influencia que tienen en la cantidad de agua que puede almacenar el suelo, el movimiento de agua en el suelo y la facilidad de abastecimiento de nutrientes, agua y aire. La textura se estudia a través de la curva granulométrica y se clasifica según el triángulo textural USDA.

La textura de estas muestras, se obtuvo de los informes proporcionados por ITAGRA, donde calcularon los porcentajes de arena, limo y arcilla (clasificación USDA), con ellos se realizan los triángulos de texturas. En la Tabla 11.12, se ve un resumen de los datos proporcionados por el ITAGRA.

Tabla 11.12. Textura USDA de cada muestra.

Muestra	% arena	% limo	% arcilla	% arena muy fina	Textura
1	26,16	24,26	49,56	14,56	ARCILLOSA
2	23,16	30,28	46,56	12,56	ARCILLOSA

Con los datos de la tabla anterior y el triángulo de texturas USDA situamos las muestras dentro de ese triángulo, que se muestra en la siguiente imagen (Figura 11.8).

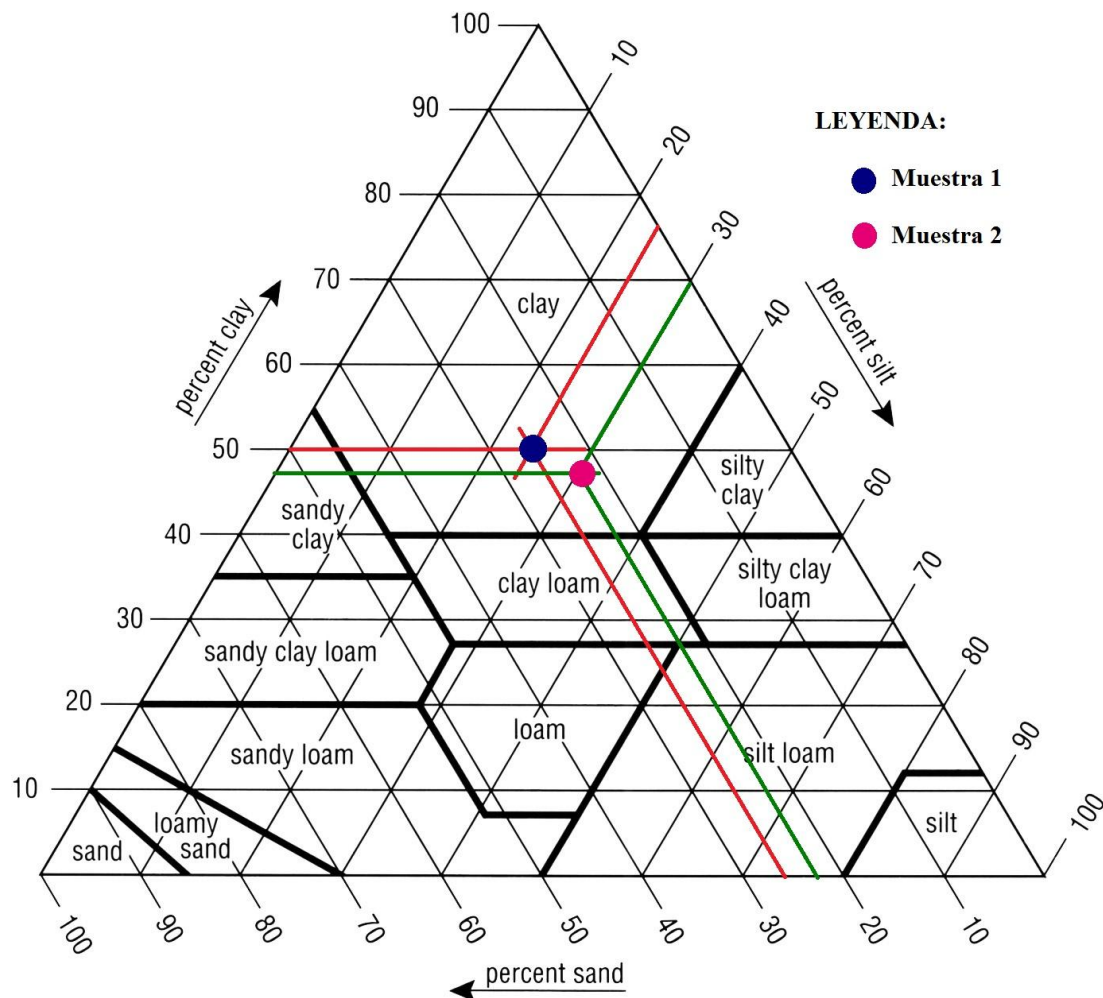


Figura 11.8. Triángulo de texturas USDA, para las muestras de la zona de estudio (USDA, 1993).

Tal y como decían los informes de ITAGRA, se observa como las muestras están dentro de una textura arcillosa de manera muy clara, no estando cerca de ninguna otra textura y confirmando las primeras observaciones realizadas en campo.

- Profundidad

Este parámetro define el espesor en centímetros del suelo hasta el lecho de roca.

La mayoría del suelo de la zona de estudio se caracteriza por tener un suelo desnudo, formado por una capa de costra y regolito, de apenas 10 cm de espesor y la cual se pierde debido a los fuertes procesos erosivos que allí ocurren.

La zona provista de vegetación el suelo está protegido por la cobertura herbácea, de los fenómenos erosivos, pero aun así en un suelo poco profundo.

- Permeabilidad

Se define como el movimiento de agua en flujo saturado en cada uno de los horizontes del suelo. Este parámetro se va a calcular por el método gráfico de Rawls and Brakensiek (1989), a través del porcentaje de arena y arcilla nos da una estimación de este valor.

En la Figura 11.9, podemos ver los valores de permeabilidad de cada muestra de suelo analizada.

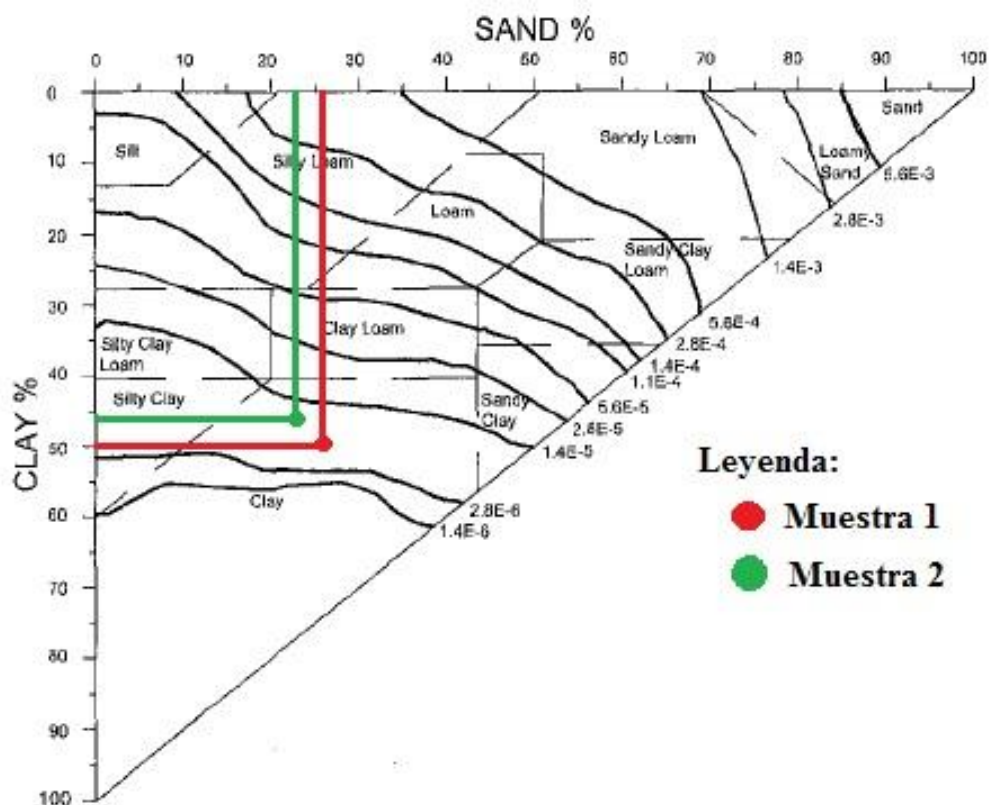


Figura 11.9. Conductividad hidráulica a saturación (cm/s) (Rawls and Brakensiek, 1989).

Para calcular el valor definitivo de la permeabilidad, se hace por interpolación y los valores obtenidos son los siguientes:

- Muestra 1: $7,7 \text{ e-}6 \text{ cm/s} = 0,077 \text{ } \mu\text{m/s} = 0,277 \text{ mm/h}$.
- Muestra 2: $1,21 \text{ e-}5 \text{ cm/s} = 0,121 \text{ } \mu\text{m/s} = 0,436 \text{ mm/h}$.

A continuación se clasifican los suelos según su conductividad hidráulica a saturación, en primer lugar por la clasificación USDA (2003) que se muestra en la Tabla 11.13.

Tabla 11.13. Conductividad hidráulica a saturación (USDA, 2003).

Clase	Conductividad hidráulica a saturación ($\eta\text{m/s}$)
Muy alta	> 100
Alta	10 - 100
Moderadamente alta	1 - 10
Moderadamente baja	0.1 - 1
Baja	0.01 - 0.1
Muy Baja	< 0.01

Atendiendo a los valores de las muestras analizadas, se observa que los suelos de la zona de estudio, están en una permeabilidad baja (muestra 1) y moderadamente baja (muestra 2).

La clasificación de permeabilidad propuesta por Wischmeier y Smith (1978), se muestra en la Tabla 11.14.

Tabla 11.14. Conductividad hidráulica a saturación (USLE, 1978).

Conductividad hidráulica a saturación (mm/h)	Clase
125 – 250	Rápida a muy rápida
62 – 125	Moderadamente rápida
20- 62	Moderada
5 – 20	Moderadamente lenta
1,2 – 5	Lenta
< 1,2	Muy lenta

Como se esperaba el valor obtenido de permeabilidad, es el más bajo, se clasifica como muy lenta.

- Capacidad de retención de agua del suelo (C.R.A.)

Es la máxima cantidad de agua capilar que puede contener un suelo. Se calcula a través de la siguiente ecuación empírica (Gandullo, 1985).

$$C.R.A.j = \left[12,5he + \frac{12,5(50 - he)k}{2} \right] c \frac{\%TF}{100}$$

$$C.R.A._{suelo} = CRA_s \times Es + CRA_i \times Ei$$

Donde:

- CRA_j = capacidad de retención en el horizonte i (mm/m).
- CRA_{suelo} = capacidad de retención en el suelo (mm/m).
- Es e Ei son respectivamente el espesor del horizonte superior e inferior (m).
- %TF: es el porcentaje de tierra fina respecto a la tierra natural.
- he : humedad equivalente de la tierra fina, se calcula a través de la siguiente expresión:

$$he = 4,6 + 0,43\% \text{Arcilla} + 0,25\% \text{Limo} + 1,22\% \text{MO}$$

- c : factor determinado por la pendiente, siendo $C = 1 - pdte/100$.
- K : factor que depende de la permeabilidad del horizonte (a_s), de la permeabilidad del horizonte inmediato inferior (a_i) y de la pendiente. Cuando el horizonte inferior es de igual o mayor permeabilidad que el superior $k = 0$, k varía entre 0 y 1 siguiendo la siguiente expresión:

$$k = 1 - ai + (1 + as)(1 - c)$$

Donde:

- a_i = permeabilidad del estrato inferior.
- a_s = permeabilidad del estrato superior.

Una vez explicado, como se calcula, pasamos a hallar este valor para cada una de las muestras tomadas, los valores de cada una de las variables, así como del valor de la C.R.A. se muestran en la Tabla 11.15.

Tabla 11.15. CRA de las muestras de la zona de estudio (mm/m).

Muestra	He	K	c	%TF	Profundidad (m)	CRA (mm/m)
1	32,26	0	0,1	70,44	1	28,40
2	32,47	0	0,1	63,86	1	25,91

11.2.4. Características químicas del suelo

- Reacción del suelo (pH)

Se valora la acidez del suelo a través del pH actual, se determina para cada horizonte, y para todo el perfil por el procedimiento de Rusell-Moore.

En función del pH, USDA (2003) propone la siguiente clasificación que se observa en la Tabla 11.16 y el valor obtenido para nuestras muestras en la Tabla 11.17.

Tabla 11.16. Clasificación del suelo en función del pH (USDA, 2003).

pH	Tipo de suelo
< 3,5	Ultra ácido
3,5 - 4,4	Extremadamente ácido
4,5 - 5	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6	Moderadamente ácido
6,1- 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Ligeramente básico
7,9- 8,4	Moderadamente básico
8,5 - 9	Fuertemente básico
>9	Muy fuertemente básico

Tabla 11.17. Clasificación de las muestras de la zona de estudio.

Muestra	pH	Clasificación USDA
1	8,25	Moderadamente básico
2	8,67	Fuertemente básico

- Salinidad

Mide la cantidad de sales en la solución del suelo. Se miden en conjunto a través de la conductividad eléctrica. Esta se ha medido con extracto de agua 1:2,5 y dada a 25° C, expresándose los resultados en mS/cm

En función de la conductividad, USDA (2003), clasifica los suelos según la Tabla 11.18.

Tabla 11.18. Clasificación del suelo en función de su conductividad (USDA, 2003).

Clase de suelo	Conductividad (dS/m)
0: No salino	0-2
1: Muy ligeramente salino	2-4
2: Ligeramente salino	4-8
3: Moderadamente salino	8-16
4: Fuertemente salino	>16

El valor de cada muestra se mide en el laboratorio y los valores que se han obtenido son los siguientes que aparecen en la Tabla 11.19.

Tabla 11.19. Valores de conductividad para las muestras.

Muestra	Conductividad (dS/m)
1	0,51
2	0,15

Como vemos los valores están dentro de la clase 0, es decir, suelos no salinos.

- Contenido en materia orgánica

La USDA propone una clasificación de los suelos en función del porcentaje de materia orgánica contenida en los 10 cm superiores del suelo; esta clasificación se muestra en la Tabla 11.20.

Tabla 11.20. Clasificación del suelo en función de la materia orgánica. (USDA, 2003).

% M.O.	Clasificación
0 – 0,25	Muy deficiente
1,75 – 3,25	Deficiente
2,5 – 5	Algo deficiente
4 – 6	Normal
5 – 10	Apreciable

Tabla 11.20 (cont). Clasificación del suelo en función de la materia orgánica. (USDA, 2003).

% M.O.	Clasificación
8 – 10	Humífero
>10	Muy humífero

Para las muestras analizadas, en el informe que nos dio ITAGRA los resultados son los siguientes (Tabla 11.21).

Tabla 11.21. Clasificación de la materia orgánica de las muestras de la zona de estudio.

Muestra	% M.O.	Clasificación USDA
1	< 0,23	Muy deficiente
2	< 0,23	Muy deficiente

Estos resultados confirman lo que se vio en campo, la escasez de materia orgánica que hace que el suelo sea muy deficiente en este aspecto.

- Abundancia de carbonatos

De los análisis de suelo realizados por ITAGRA se observa que la cantidad de carbonatos es muy baja para todos los horizontes. La presencia de caliza activa es minúscula, se puede decir que estamos ante un suelo totalmente descarbonatado.

- Cationes de cambio

En el análisis de suelo elaborado por ITAGRA se proporcionan la cantidad de calcio, magnesio, potasio, sodio y fósforo del suelo (Tabla 11.22).

Tabla 11.22. Cationes de cambio obtenidos en los análisis del suelo.

Muestra	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100g)	K ⁺ (meq/kg)	Na ⁺ (meq/100g)	P ⁺ (meq/100g)
1	42,9	1,5	0,22	0,07	< 0.01
2	37,6	1,12	0,24	0,03	< 0.01

Una vez mostrados los resultados numéricos, pasamos a clasificar esos resultados, con un extracto del informe facilitado por ITAGRA, que se muestra en la Figura 11.10.

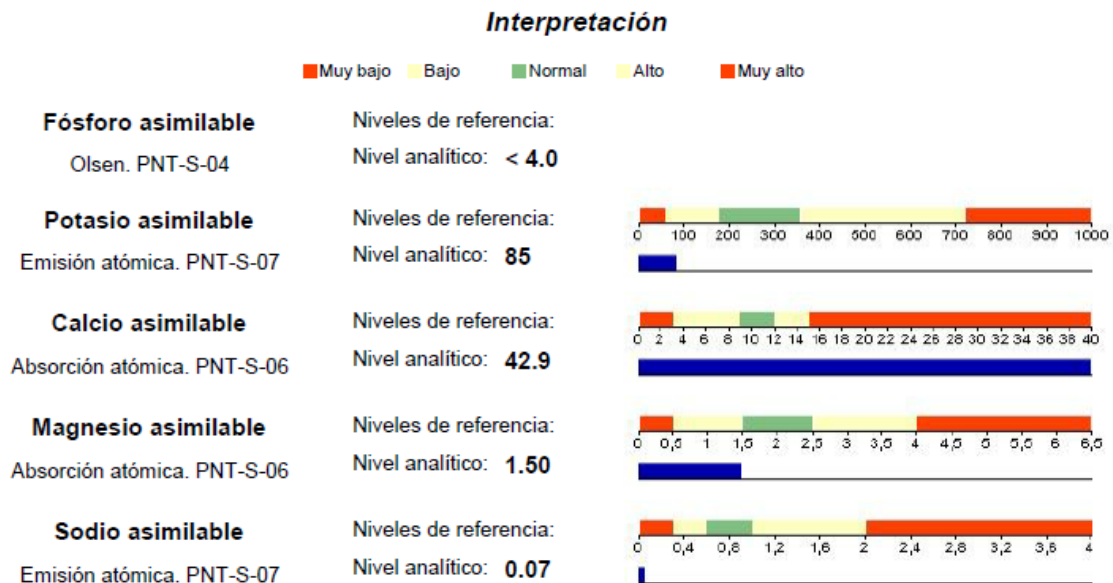


Figura 11.10. Valores de los cationes de cambio para la muestra 1 (ITAGRA, 2015).

Analizando los resultados vemos como la mayoría de niveles son bajos o muy bajos excepto el del calcio que se encuentra en una concentración muy alta. A continuación, en la Figura 11.11, se muestran los resultados de la muestra 2.

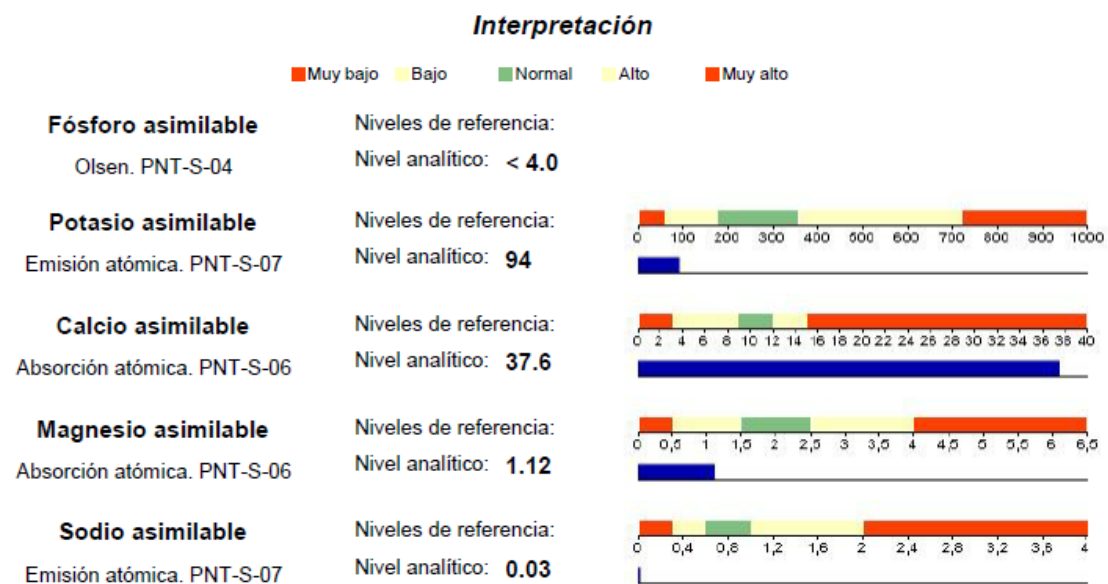


Figura 11.11. Valores de los cationes de cambio para la muestra 2 (ITAGRA, 2015).

Como en el caso de la muestra anterior, el resultado es prácticamente el mismo, todos los elementos a excepción del calcio están en cantidades muy bajas.

11.2.5. Índices de erosionabilidad del suelo

Se define erosionabilidad del suelo como la susceptibilidad de éste a ser erosionado y se va a estudiar a través de los siguientes índices:

- Índice de Boyoucos (Ib)

Este índice se basa en la textura del suelo, en la relación entre las partículas sin cohesión del suelo y las cohesivas. Su expresión es:

$$Ib = \frac{\%arena + \%lmo}{\%arcilla}$$

El resultado para nuestras dos muestras es el siguiente:

- Muestra 1:

$$Ib = \frac{26,16 + 24,28}{49,56} = 1,02$$

- Muestra 2:

$$Ib = \frac{23,16 + 30,18}{46,56} = 1,15$$

Atendiendo a los resultados obtenidos, los suelos más susceptibles de erosionarse, son los de la muestra 2. Es importante destacar que este índice no tiene en cuenta la pendiente, solo tiene en cuenta la textura del suelo.

Se puede ver como no hay diferencias significativas entre ambas muestras de suelo, y es razonable que el suelo más susceptible a la erosión es el que está situado en la zona de cabecera de la cárcava.

- Índice del SEI (Soil Erosion Index)

Este índice trata de saber la susceptibilidad del suelo a la erosión a través de tres factores como son la textura, la profundidad y la pedregosidad y cuya fórmula de cálculo es la siguiente:

$$SEI = \circ \text{textura} \cdot \circ \text{profundidad} \cdot \circ \text{pedregosidad}$$

El grado de textura, profundidad y pedregosidad se pueden ver en las tablas 11.23, 11.24 y 11.25 respectivamente.

Tabla 11.23. Grado de textura.

Grado de textura	Tipo	Textura
1	Ligeramente erosionable	Arcillosa, arcillo-arenosa o arcillo-limosa
2	Moderadamente erosionable	franco-arcillo-arenosa; franco-arcillosa; franco-arcillo-limosa; arenosa-franca o arenosa
3	Altamente erosionable	franca; franco-limosa; limosa o franco-arenosa

Tabla 11.24. Grado de profundidad.

Grado de profundidad	Tipo	Profundidad (cm)
1	Ligeramente erosionable	>75
2	Moderadamente erosionable	25- 75
3	Altamente erosionable	< 25

Tabla 11.25. Grado de pedregosidad.

Grado de pedregosidad	Tipo	% Cobertura
1	Protegido	> 10
2	No protegido	< 10

Los grados de erosionabilidad SEI, en función de los grados de textura, profundidad y pedregosidad aparecen reflejados en la Tabla 11.26.

Tabla 11.26. Grados de erosionabilidad del suelo del SEI

Grado del SEI	Clasificación	Intervalo
1	Erosionabilidad baja	0-3
2	Erosionabilidad moderada	3-6
3	Erosionabilidad alta	>6

A continuación se pasa a calcular este índice para las muestras tomadas de nuestra zona de estudio.

- Muestra 1:

Textura → Arcillosa → ° textura = 1.

Profundidad → 10 cm → ° profundidad = 3.

Pedregosidad → < 10% → ° pedregosidad = 2.

$$SEI = 1 \times 3 \times 2 = 6 \rightarrow \text{erosionabilidad media - alta.}$$

- Muestra 2:

Textura → Arcillosa → ° textura = 1.

Profundidad → 10 cm → ° profundidad = 3.

Pedregosidad → < 10% → ° pedregosidad = 2.

$$SEI = 1 \times 3 \times 2 = 6 \rightarrow \text{erosionabilidad media - alta.}$$

Analizando los resultados obtenidos en este índice, se observa que los suelos de la zona de estudio, son muy susceptibles a la erosión, a pesar de que este índice tampoco tiene en cuenta la pendiente.

- Factor de erosionabilidad del suelo (Factor K de la USLE)

Este factor representa la pérdida de suelo cuantificada por unidad de erosividad en una determinada superficie. El valor de K se encuentra entre 0 y 1 siendo el valor máximo entorno a 0,9 para suelos en que la arena muy fina y el limo ocupan la práctica totalidad de la muestra. La ecuación empírica que permite su cálculo es:

$$K = 10^{-6} \times 2.71 \times M^{1.14} \times (12 - a) + 0,042 \times (b - 2) + 0,0323 \times (c - 3)$$

Donde:

- K= factor de erosividad de la lluvia ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot m^2 \cdot h$)
- M = depende de la textura del suelo = (% limo + % arena muy fina) \times (100-%arcilla).
- a = materia orgánica del suelo (%).
- b = evalúa la estructura del suelo (Tabla 11.27).

- c = permeabilidad (Tabla 11.28).

Tabla 11.27. Valores del parámetro “b” (Almorox *et al.*, 1994).

Estructura	Valor del parámetro “b”
Granular muy fina (< 1 mm)	1
Granular fina (1 – 2 mm)	2
Granular media a gruesa (2 – 10 mm)	3
Laminar, maciza y cúbica	4

Tabla 11.28. Valores del parámetro “c” (Almorox *et al.*, 1994).

Permeabilidad (mm/h)	Clase	Valor del parámetro
125 - 250	Rápida a muy rápida	1
62 – 125	Moderadamente rápida	2
20 – 62	Moderada	3
5 – 20	Moderadamente lenta	4
1,2 – 5	Lenta	5
< 1,2	Muy lenta	6

A continuación se presentan los cálculos para nuestra zona de estudio:

- Muestra 1:

$$M = 1959,09 \quad b = 4$$

$$a = 0,23 \% \quad c = 6$$

$$K = 10^{-6} \times 2.71 \times 1959,09^{1,14} \times (12 - 0,23) + 0,042 \times (4 - 2) + 0,0323 \times (6 - 3)$$

$$K = 0,36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1} \cdot \text{hJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

- Muestra 2:

$$M = 2289,37 \quad b = 4$$

$$a = 0,23 \% \quad c = 6$$

$$K = 10^{-6} \times 2.71 \times 2289,37^{1,14} \times (12 - 0,23) + 0,042 \times (4 - 2) + 0,0323 \times (6 - 3)$$

$$K = 0,20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1} \cdot \text{hJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

En caso de haber pedregosidad en la zona, el factor K debe corregirse, pero como en esta zona la pedregosidad es escasa, se decide no corregir este factor.

11.3. Caracterización hidrológica

11.3.1. Cuenca de estudio

Se define cuenca vertiente a una zona de la superficie terrestre, en la cual el agua procedente de las precipitaciones caídas sobre ella, se dirige hacia un mismo punto de salida. (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

Para el caso de la cuenca de estudio, ese punto de salida se encuentra en el límite de la cuenca, es decir, el agua que recoge la cuenca se va fuera de la misma, estamos por tanto ante una cuenca exorreica.

Para poder delimitar la superficie de la cuenca, se trazó su divisoria topográfica con la cartografía obtenida a través del MDT (IGN, 2011). Por otra parte, la divisoria de escorrentía directa se ha obtenido mediante el uso de un GPS de precisión centimétrica modelo Leica (Figura 11.12).



Figura 11.12. Uso del GPS centimétrico para delimitar la divisoria de escorrentía directa.

A continuación se exponen las características principales de la cuenca vertiente:

- Superficie de la cuenca = 37228,46 m².
- Perímetro de la cuenca = 1041,26 m.
- Altitud máxima = 911 m.
- Altitud mínima = 977 m.

- Longitud del cauce principal = 369 m.
- Cota máxima del cauce principal = 976 m.
- Longitud de todos los cauces = 1136,06 m.
- Longitud de la cuenca = 441,68 m.

11.3.2. Parámetros físicos de la cuenca vertiente

- Divisoria de la cuenca vertiente

En la Figura 11.13, se muestra la divisoria de la cuenca, la divisoria de escorrentía directa y los principales cauces de la red de drenaje de la cárcava de estudio.

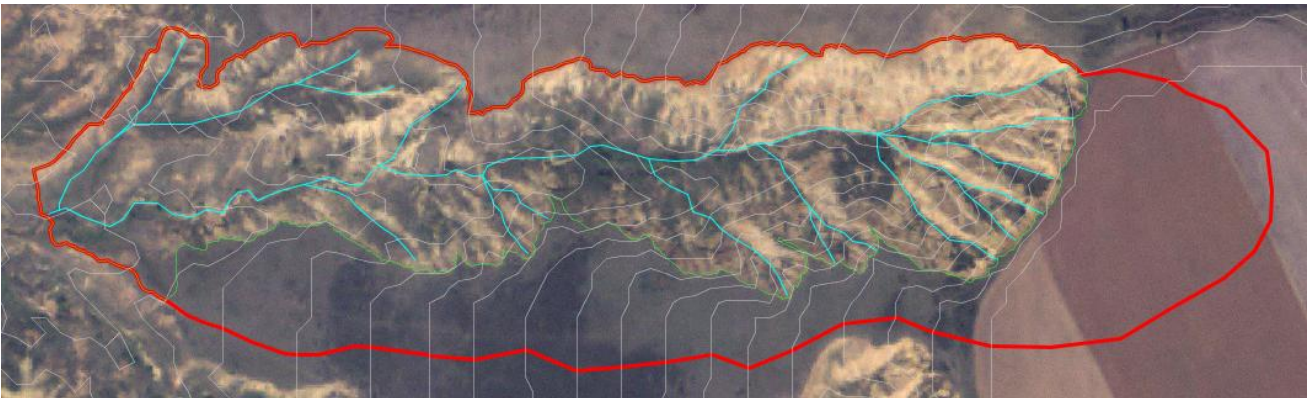


Figura 11.13. Divisorias y cauces de la cuenca de estudio. Rojo: Divisoria de la cuenca; Verde: divisoria de escorrentía directa; Azul: principales cauces de la cuenca; Gris: curvas de nivel cada 5 m.

- Superficie de la cuenca y clasificación según la Directiva Marco

La superficie de la cuenca de estudio, como señalamos anteriormente es de $37228,46 \text{ m}^2$
 $= 0,03723 \text{ km}^2$.

La clasificación que propone esta directiva se puede ver en la Tabla 11.29.

Tabla 11.29. Clasificación de las cuencas hidrológicas propuesta por la Directiva Marco de Aguas 2000/60/CE. Fuente: www.boe.es

1.2.1. Ríos

Sistema A

Tipología fijada	Descriptor
Región ecológica	Regiones ecológicas que figuran en el mapa A del anexo XI
Tipo	<p>Tipología en función de la altitud</p> <p>alto: > 800 m</p> <p>altura media: 200 a 800 m</p> <p>tierras bajas: < 200 m</p> <p>Tipología según el tamaño en función de la superficie de la cuenca de alimentación</p> <p>pequeño: 10 a 100 km²</p> <p>mediano: > 100 a 1 000 km²</p> <p>grande: > 1 000 a 10 000 km²</p> <p>muy grande: > 10 000 km²</p> <p>Geología</p> <p>calcáreo</p> <p>silíceo</p> <p>orgánico</p>

Con esa superficie y según la Directiva Marco de Aguas 2000/60/CE estamos ante una cuenca muy pequeña (<10 km²), susceptible a tormentas y según su altitud ante una cuenca alta (>800m de altitud).

- Índice de forma (I_F)

Su expresión de cálculo es la siguiente:

$$I_f = \frac{S}{L_c} = \frac{0,03723 \text{ km}^2}{0,4157 \text{ km}} = 0,089 \text{ km}$$

Donde:

- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 km².
- L_c = Longitud de la cuenca = 0,4157 m.

- Índice de compacidad o de Gravellius (K_G)

La fórmula utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$K_g = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} = 0,28 \frac{1041,26}{\sqrt{37228,46}} = 1,51$$

Donde:

- P = Perímetro de la cuenca = 1041,26 m.
- S = Superficie de la cuenca = 37228,46 m².

Los valores del índice de *Gravellius* son siempre superiores a la unidad. En la Tabla 11.30, podemos ver los valores, así como la clasificación que puede tomar este índice.

Tabla 11.30. Valores y clasificación del Índice de compacidad (K_G).

Valores	Forma de la cuenca
1 – 1,25	Redonda
1,25 – 1,50	Ovalada
1,50 – 1,75	Oblonga

El valor que toma el índice es de 1,51 por lo tanto estamos ante una cuenca de forma oblonga en limite con una ovalada, cuanto más se acerque el valor de este índice a la unidad más redonda es la cuenca.

- Relación de elongación (Re)

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\text{Sup. cuenca}}{\frac{\pi \cdot (Lc)^2}{4}} = \frac{0,03723}{\frac{\pi \cdot (0,4157)^2}{4}} = 0,27 \neq 1 \rightarrow \text{Alargada}$$

Donde:

- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 km².
- Lc = Longitud de la cuenca = 0,4157 m².

Re = 0,27 estamos en una cuenca alargada de lo que se deduce que el agua sale rápidamente de la cuenca.

- Curva hipsométrica

Con esta curva se ofrece una visión del relieve y de la altimetría de la cuenca. Por encima de la sección de cierre de la cuenca se halla el 100 % de su superficie, si nos movemos altimétricamente hacia el punto más alto de la cuenca y calculamos a partir de

cada curva de nivel las áreas acumuladas por encima de ellas, podemos calcular la curva hipsométrica. Los datos se pueden observar en la Tabla 11.31 y su representación gráfica en la Figura 11.14.

Tabla 11.31. Superficie por encima de las curvas de nivel y su acumulado.

Altitud (m)	Sup. por encima (m ²)	Porcentaje (%)
977	0	0%
975	6.304,31	17%
970	7.514,55	20%
965	9.048,94	24%
960	10.785,83	29%
955	12.691,96	34%
950	14.811,78	40%
945	17.195,67	46%
940	19.906,6	53%
935	22.382,29	60%
930	24.738,62	66%
925	27.981,87	75%
920	33.023	89%
915	36.091,51	97%
911	37.228,46	100%

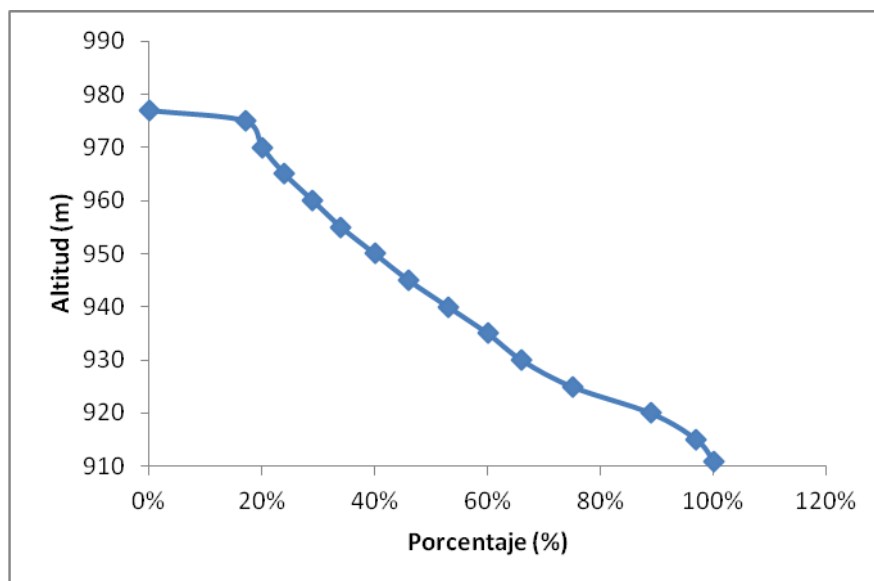


Figura 11.14. Curva hipsométrica de la cuenca de estudio.

Si analizamos la curva hipsométrica, se puede observar como en la parte superior de la cuenca la pendiente es baja, se corresponde con la zona de páramo, para posteriormente entrar en una zona de fuerte pendiente, que según descende en altitud dicha inclinación se va suavizando. Esta distribución hipsométrica se corresponde con un perfil de encajamiento.

- Curva de frecuencias

Representa el porcentaje de superficie entre dos curvas de nivel consecutivas (con una equidistancia de 5 m.). En la Tabla 11.32 se expone el valor de la superficie entre curvas de nivel consecutivas en términos absolutos y relativos.

Tabla 11.32. Superficie entre curvas de nivel (m² y %).

Altitud (m)	Superficie (m ²)	%Superficie
975 - 977	6.304,31	17%
970 - 975	1.210,24	3%
965 - 970	1.534,39	4%
960 - 965	1.736,89	5%
955 - 960	1.906,13	5%
950 - 955	2.119,82	6%
945 - 950	2.383,89	6%
940 - 945	2.710,93	7%
935 - 940	2.475,69	7%
930 - 935	2.356,33	6%
925 - 930	3.243,25	9%
920 - 925	5.041,13	14%
915 - 920	3.068,51	8%
911 - 915	1.131,11	3%

La curva de frecuencias obtenida a través de la tabla anterior, se representa en la Figura 11.15.

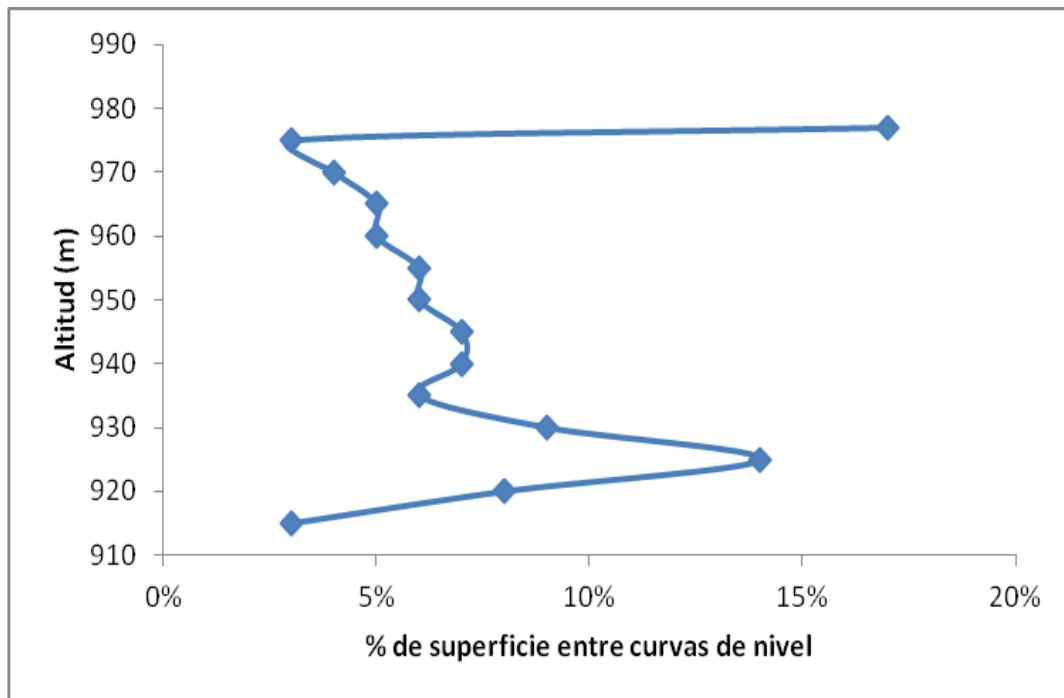


Figura 11.15. Curva de frecuencias de la cuenca de estudio.

- Altura media (A_m)

Existen dos métodos de cálculo:

La primera, como la media ponderada a la superficie de la altura media de cada curva de nivel. Su fórmula es la siguiente:

$$A_m = \frac{\sum_i^m H_i \cdot S_i}{S}$$

Donde:

- S_i = Es la superficie entre dos curvas de nivel consecutivas.
- H_i = Es la altura media entre cada dos curvas de nivel (descontando la cota a la que está la sección de control).
- S = Superficie de la cuenca = 37228,46 m².

En la Tabla 11.33, se muestra el cálculo de este parámetro.

Tabla 11.33. Desglose de los cálculos para obtener la altura media de la cuenca.

Altitud (m)	Altura media (m)	Sup. (m ²)	H*Sup
911 - 915	2	1.131,11	2.262,22
915 - 920	7,5	3.068,51	23.013,82
920 - 925	12,5	5.041,13	63.014,12
925 - 930	17,5	3.243,25	56.756,87
930 - 935	22,5	2.356,33	53.017,42
935 - 940	27,5	2.475,69	68.081,47
940 - 945	32,5	2.710,93	88.105,22
945 - 950	37,5	2.383,89	89.395,87
950 - 955	42,5	2.119,82	90.092,35
955 - 960	47,5	1.906,13	90.541,17
960 - 965	52,5	1.736,89	91.186,72
965 - 970	57,5	1.534,39	88.227,42
970 - 975	62,5	1.210,24	75.640
975 - 977	66,5	6.304,31	419.236,61
		Total	1.298.571,34

Una vez que tenemos el valor total, se calcula la Altura Media a través de la siguiente fórmula:

$$Am = \frac{\sum_i^m H_i \cdot S_i}{\text{Superficie}} = \frac{1298571,34}{37228,46} = 34,88 \text{ m}$$

Por lo tanto $Am = 34,88 \text{ m}$.

La segunda forma de cálculo es a través del volumen de la cuenca, deducido del área bajo la curva hipsométrica.

$$Am = \frac{Vc}{S} = \frac{1440512,0}{37228,46} = 38,69 \text{ m}$$

Donde:

- V_c = Volumen bajo la curva hipsométrica = Volumen cuenca = 1440512 m³.
- S = Superficie de la cuenca = 37228,46 m².

En la Tabla 11.34, se muestra la superficie de la sección de cada altura.

Tabla 11.34. Superficie de cada sección.

Altitud (m)	Superficie acumulada (m ²)	% Superficie Acumulada	Superficie de cada sección (m ³)
977	0	0%	424.910,49
975	6.304,31	17%	80.965,05
970	7.514,55	20%	94.978,74
965	9.048,94	24%	98.829,04
960	10.785,83	29%	98.928,14
955	12.691,96	34%	99.419,55
950	14.811,78	40%	99.884,99
945	17.195,67	46%	100.033,31
940	19.906,6	53%	78.974,51
935	22.382,29	60%	63.385,27
930	24.738,62	66%	71.027,17
925	27.981,87	75%	85.195,09
920	33.023	89%	36.515,26
915	36.091,51	97%	7.465,32
911	37.222,62	100%	-
TOTAL			1.440.512,00

Por el segundo método obtenemos una $A_m = 38,69$ m. ligeramente superior a la calculada por el primer método, aunque esta dentro del mismo orden de magnitud. Para los cálculos de este anejo se va a utilizar la altura media obtenida por el primer método.

- Amplitud de relieve y altitud media

Se define amplitud de relieve como la diferencia entre la altitud máxima y la altitud mínima de la cueca.

$$\text{Amplitud de relieve} = H_{\max} - H_{\min} = 977 - 911 = 66 \text{ m}$$

$$\text{Altitud media} = H_{\min} + \text{Altura media} = 911 + 34,88 = 945,88 \text{ m}$$

- Rectángulo equivalente

Se define como un rectángulo que tiene la misma superficie y perímetro que la cuenca de estudio e igual distribución hipsométrica, por lo que poseerá el mismo coeficiente de compacidad. Su representación gráfica se observa en la Figura 11.16. Sus lados se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4} = \frac{1,0412 + \sqrt{(1,0412)^2 - 16(0,03723)}}{4} = 0,435km = 435 \text{ m}$$

Lado mayor = L = 435 m.

$$l = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16S}}{4} = \frac{1,0412 - \sqrt{(1,0412)^2 - 16(0,03723)}}{4} = 0,0855km = 85,5 \text{ m}$$

l = lado menor = l = 85,5 m.

Donde:

- P = Perímetro de la cuenca = 1,04126 km.
- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 km².

En la Figura 11.16, se muestra la curva hipsométrica y el rectángulo equivalente de la cuenca.

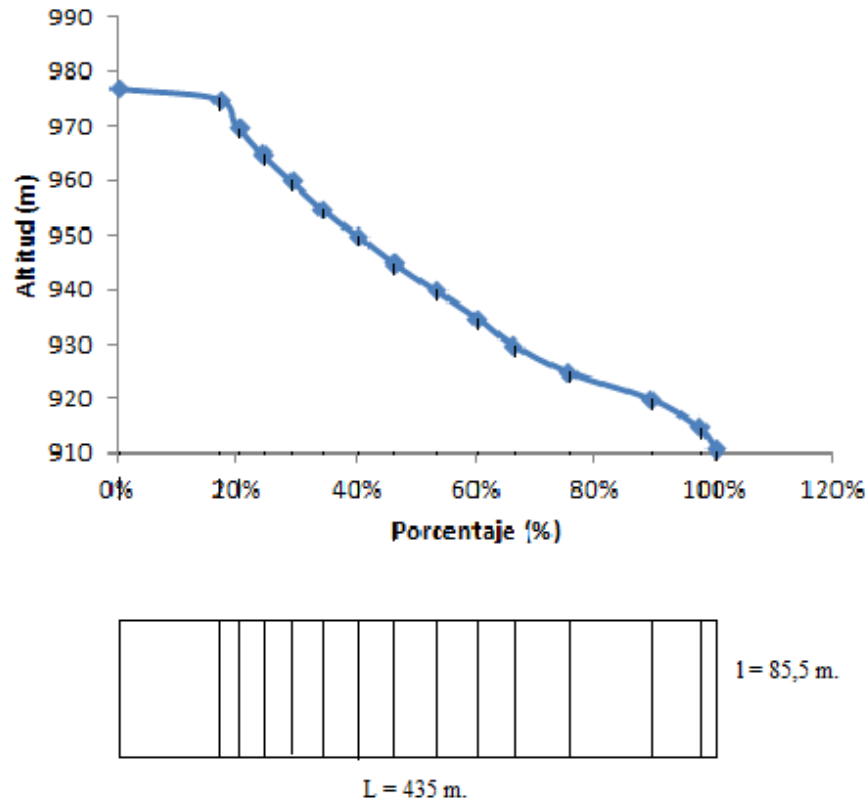


Figura 11.16. Curva hipsométrica y rectángulo equivalente de la cuenca.

- Relación de relieve (Rr)

Se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Rr = \frac{H \text{ max} - H \text{ min}}{Lc} = \frac{977 - 911}{415,73} = 0,159$$

Donde:

- Hmax = Altitud máxima de la cuenca = 977 m.
- Hmin = Altitud mínima de la cuenca = 911 m.
- Lc = Longitud de la cuenca = 415,73 m.

- Índice de Pendiente Relativo (Jr)

Este índice nos sirve como una primera aproximación de la pendiente media de la cuenca. Y su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$Jr(\%) = \sqrt{\frac{H \text{ max} - H \text{ min}}{L}} = \sqrt{\frac{0,977 - 0,911}{0,435}} = 0,389 \times 100 = 38,9\%$$

Donde:

- H_{max} = Altitud máxima de la cuenca = 977 m.
- H_{min} = Altitud mínima de la cuenca = 911 m.
- L = Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente = 435 m.

- Pendiente media de la cuenca (J_c)

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$J_c(\%) = \frac{D * L_{TCN}}{S} = \frac{0,005 * 2,643}{0,03723} = 0,355 \times 100 = 35,5\%$$

Donde:

- D = Equidistancia entre las curvas de nivel = 5 m.
- L_{TCN} = Longitud de todas las curvas de nivel = 2643,02 m.
- S = Superficie de la cuenca = 37228,46 m².

- Coefficiente de Masividad de *Martonne*

Se define como la relación entre la altura media de la cuenca (A_m) y su superficie horizontal (km²). Y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$tg \alpha = \frac{A_m(m)}{S(km^2)} = \frac{34,88}{0,03723} = 936,88 \text{ m} / \text{km}^2$$

Donde:

- A_m = Altura media de la cuenca = 34,88 m.
- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 km².

Para cuencas pequeñas donde se desciende rápidamente en altitud este coeficiente alcanza valores muy grandes.

- Coefficiente orográfico de *Fournier*

Se define como el producto de la altura media por el Coeficiente de Masividad de *Martonne*.

$$Co = A_m * tg \alpha = 34,88 * 936,88 = 32678 \text{ m}^2/\text{km}^2 = 326,8 \text{ m}^2/\text{ha}$$

Si $Co > 6 \text{ m}^2/\text{ha}$ estamos ante una cuenca de relieve acentuado.

Si $Co < 6 \text{ m}^2/\text{ha}$ estamos ante una cuenca de relieve poco acentuado.

Según el resultado de este índice, estamos ante una cuenca de relieve muy acentuado.

- Factor topográfico medio de la cuenca. Factor LxS de la MUSLE

La expresión para el cálculo del factor LxS cuando $Jc (\%) > 9 \%$ es la siguiente:

$$LxS = \left(\frac{\gamma(m)}{22,13} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{Jc(\%)}{9} \right)^{1,3}$$

Donde:

- γ = Longitud de ladera media de la cuenca (m).

$$\gamma = 500 / Dd = 16,38 \text{ m.}$$

$$Dd = \text{Densidad de drenaje} = 30,52.$$

- $Jc (\%)$ = Pendiente media de la cuenca = 35,5 %.

$$LxS = \left(\frac{16,38}{22,13} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{35,49}{9} \right)^{1,3} = 5,44$$

El valor de LxS es menor de 10, lo que nos indica que estamos ante una cuenca de relieve poco acentuado.

11.3.3. Parámetros de la red de drenaje

- Esquema de la red de drenaje y longitud del cauce principal

En la Figura 11.17, se puede observar el esquema de la red de drenaje de la cuenca de estudio.



Figura 11.17. Red de drenaje de la cuenca de estudio.

La longitud del cauce principal es de 369 m.

- Clasificación de Strahler y Horton

La distribución de las corrientes en las cuencas sigue unas pautas de organización y jerarquía que son importantes a la hora de mantener el equilibrio dinámico de la red hidrográfica. Se denominan corrientes de primer orden a aquellas corrientes que no reciben ningún afluente. Al juntarse dos corrientes de primer orden forman una corriente de segundo orden y así sucesivamente.

Clasificación de Strahler

En la Figura 11.18 se muestra esta clasificación.

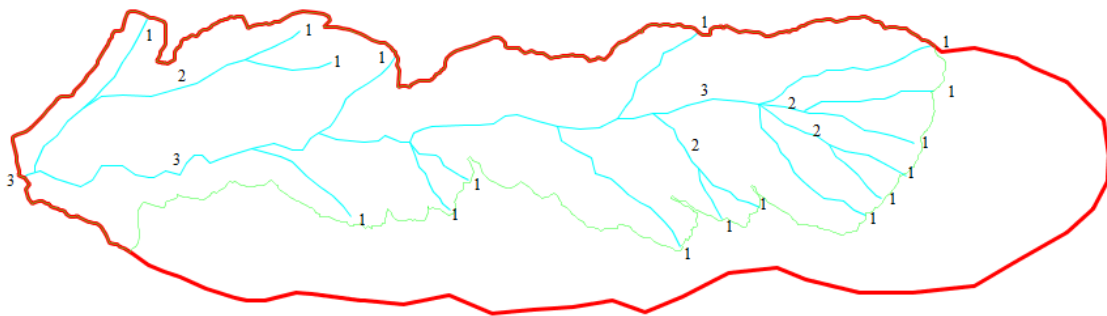


Figura 11.18. Clasificación de *Strahler* para la cuenca de estudio.

Una vez realizada esta clasificación, a modo de resumen se puede concluir lo siguiente:

- N_1 = Número de cauces de primer orden = 17.
- N_2 = Número de cauces de segundo orden = 4.
- N_3 = Número de cauces de tercer orden = 1.
- N_T = Número total de cauces = 22.

- Clasificación de Horton

Horton dice que hay que considerar que todo el curso de agua ha de tener el mismo orden desde su principio a su final. En la Figura 11.19, se puede ver esta clasificación.

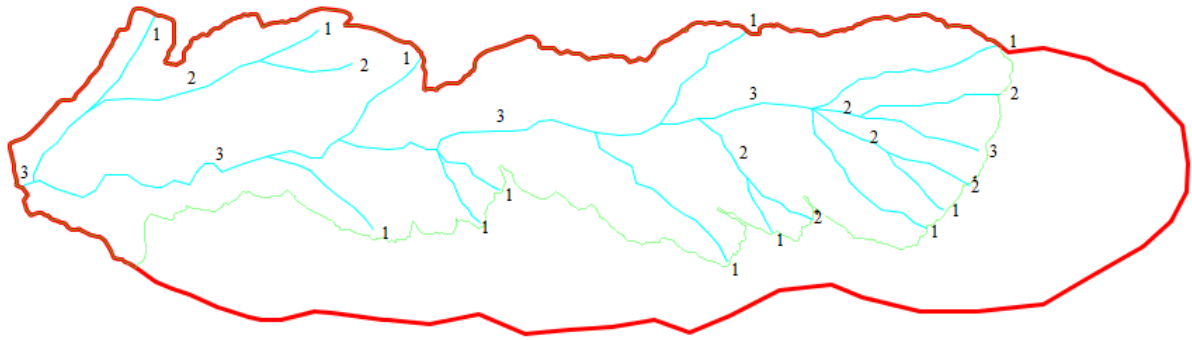


Figura 11.19. Clasificación de *Horton* para la cuenca de estudio.

- Pendiente media del cauce principal ($J_{\text{río}}$)

Su expresión es la siguiente:

$$J_{\text{río}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{L_{\text{río}}} = \frac{0,976 - 0,911}{0,369} = 0,176 \times 100 = 17,6\%$$

Donde:

- H_{max} = Cota máxima del cauce principal = 976 m.
- H_{min} = Cota mínima del cauce principal (sección de cierre) = 911 m.
- $L_{\text{río}}$ = Longitud del cauce principal = 369 m.

Al ser la pendiente del cauce principal mayor del 2%, se puede afirmar que se trata de un cauce con carácter torrencial.

- Tiempo de concentración (t_c)

Se define tiempo de concentración como el tiempo que tarda la gota más alejada de la sección de cierre en pasar por ella. En este estudio se va a calcular a través de la fórmula establecida por el MOPU (1987).

$$t_c = 0,3 * \left(\frac{L_{\text{río}}}{(J_{\text{río}})^{0,25}} \right)^{0,76} = 0,3 * \left(\frac{0,369}{(0,176)^{0,25}} \right)^{0,76} = 0,195 \text{ horas} = 11,7 \text{ min}$$

Donde:

- $L_{\text{río}}$ = Longitud del cauce principal = 369 m.
- $J_{\text{río}}$ = Pendiente media del cauce principal (t.p.u.) = 0,176.

El tiempo de concentración es muy pequeño, lo que implica una salida muy rápida de los caudales generados, pudiendo ocasionar problemas debido a que produce golpes de agua de manera muy veloz.

- Densidad de drenaje (Dd)

Se define como la longitud de todos los cursos entre la superficie de la cuenca.

$$Dd = \frac{L_{tc}}{S_{cuenca}} = \frac{1,13608}{0,03723} = 30,52 \text{ km/ km}^2$$

Donde:

- L_{tc} = Longitud de todos los cursos de agua = 1136,08 m.
- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 km².

El valor de la densidad de drenaje se encuentra en el intervalo (20-40) por lo que se clasifica como alta-fina (materiales muy blandos y/o cubierta vegetal escasa).

- Canal de alimentación (Ca)

Cantidad de superficie de la cuenca necesaria para crear 1 km de cauce. Se calcula como la inversa de la densidad de drenaje.

$$Ca = \frac{1}{Dd} = \frac{1}{30,52} = 0,033 \text{ km}^2/\text{km}$$

Donde:

- Dd = Densidad de drenaje = 30,52 km/km².

Existen 1 km de curso de agua cada 0,033 km² de cuenca.

- Distancia de esorrentía (De)

Su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$\text{Dist. esc} = 0,5 \times Ca = 0,5 \times 0,033 = 0,0163 \text{ km}^2/\text{km}$$

Donde:

- Ca = Canal de alimentación = 0,033 km²/km.

- Alejamiento medio (am)

Su expresión se muestra a continuación:

$$am = \frac{Lm}{\sqrt{S}} = \frac{0,369}{\sqrt{0,03723}} = 1,91$$

Donde:

- Lm= Longitud del cauce más largo = 0,369 km.
- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 m².

- Coficiente de torrencialidad (Ct)

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Ct = \frac{Dd * N}{S} = \frac{30,52 * 17}{0,03723} = 13936,07$$

Donde:

- Dd = Densidad de drenaje = 30,52 km/km².
- N = Número de afluentes que llegan al cauce principal = 17 afluentes.
- S = Superficie de la cuenca = 0,03723 km².

- Frecuencia de cauces (F)

Representa el número de cauces existentes en cada km² de cuenca.

$$F = \frac{\sum_i^n n_i}{S} = \frac{22}{0,03723} = 590,9 \text{ Cauces/ km}^2$$

Donde:

- N = Número total de cauces = 22.
- S= Superficie de la cuenca = 0,03723 km².

- Radio de bifurcación (Rb)

Se define como el valor medio de los radios de bifurcación correspondiente a cada orden.

$$Rb = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

$$Rb_1 = \frac{N_1}{N_2} = \frac{17}{4} = 4,25$$

$$Rb_2 = \frac{N_2}{N_3} = \frac{4}{1} = 4$$

$$Rb \text{ medio} = 4,125$$

Con el resultado obtenido en el radio de bifurcación, un valor superior a 4, se puede afirmar que estamos ante una cuenca de carácter torrencial. Hay similitud entre los radios de bifurcación calculados de distinto orden, esto quiere indicar que existe una homogeneidad litológica en la cuenca.

- Perfil longitudinal del cauce principal

En la Figura 11.20, se muestra el perfil longitudinal del cauce principal.

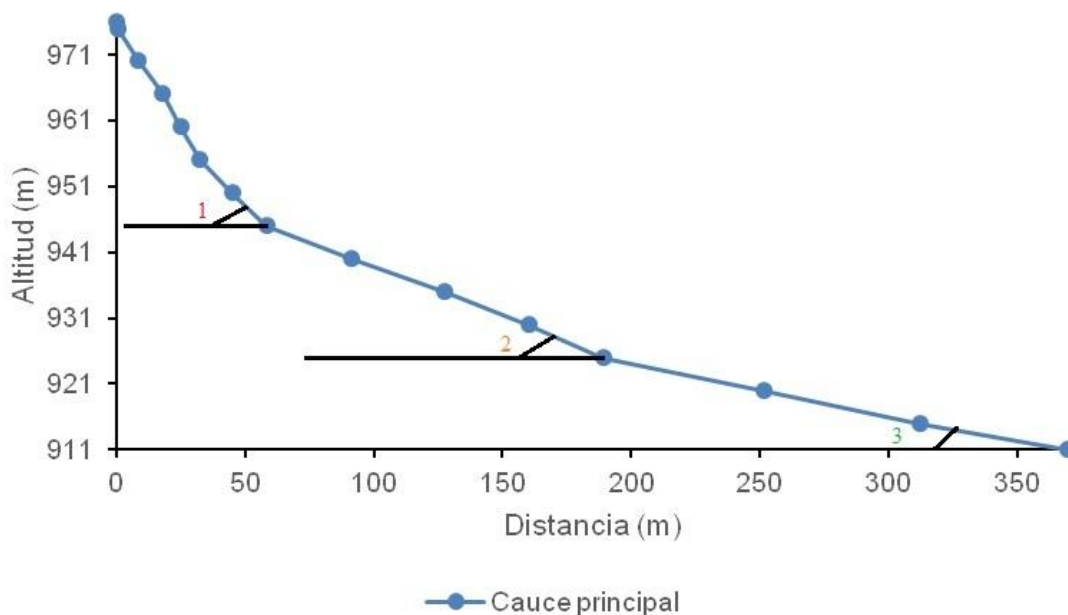


Figura 11.20. Perfil longitudinal del cauce principal.

Analizando el perfil anterior, se puede ver que es de tipo torrencial. Desciende rápidamente en su inicio para luego ir disminuyendo poco a poco su pendiente. Se pueden observar tres zonas de diferente pendiente. La zona de cabecera (1) caracterizada por fuertes pendientes (53,44 %), una zona intermedia (2) donde la pendiente se va suavizando (15,26 %) y finalmente la zona cercana a la sección de cierre (3) en la que la pendiente ya es más tendida (5,88 %).

11.4. Vegetación

11.4.1. Vegetación potencial

11.4.1.1. Ámbito biogeográfico

Se define como ámbito biogeográfico, la calificación de una región por medio de clasificaciones jerárquicas basadas en aspectos geográficos y climáticos de la misma.

Esta clasificación se realiza según la propuesta por Rivas Martínez (2007) que para la zona de Villantodrigo (Palencia) se corresponde con la siguiente:

- Reino Holártico
- Región Mediterránea
- Subregión Mediterránea Occidental
- Provincia Mediterránea Ibérica Occidental
- Subprovincia Carpetano Leonesa
- Sector Planileonés
- Distrito Valdaviés

10.4.1.2. Pisos bioclimáticos

La bioclimatología permite establecer dentro de cada región biogeográfica una serie de pisos bioclimáticos. Éstos se definen como cada uno de los tipos o espacios termoclimáticos que se suceden en una serie altitudinal. En la práctica se delimitan en función de aquellas fitocenosis que presentan claras correlaciones con determinados intervalos termoclimáticos. El piso bioclimático se determina atendiendo a la clasificación de la zona según el índice de termicidad (I_t) propuesto por Rivas-Martínez (1987).

$$I_t = (T + M + m) \times 10 = 167$$

Donde:

- T = temperatura media anual = 10,9 °C.
- M = media de las máximas del mes más frío = 7 °C.
- m = media de las mínimas del mes más frío = - 1,2 °C.

$$8 < T < 13 \quad 2 < M < 9 \quad -4 < m < -1 \quad 60 < I_t < 210$$

Según los valores anteriores estamos situados en el piso supramediterráneo, pudiendo distinguir entre tres horizontes:

$61 < I_t < 110$ Superior $111 < I_t (130,3) < 160$ Medio $161 < I_t < 210$ Inferior

Por lo que estamos situados en un piso supramediterráneo inferior.

10.4.1.3. Serie climatófila

Según el mapa de las series de vegetación de Rivas-Martínez (1987), Villantodrigo se sitúa en la serie 19b que es la siguiente: Serie supra-mesomediterránea castellano-alcarreño-manchega basófila de *Quercus faginea* (Rivas-Martínez, 1987). Esta serie tras la última actualización del año 2011, pasa a denominarse: Serie climatófila castellana calcícola mediterránea pluviestacional oceánica meso-supramediterránea seco-subhúmeda de los bosques de *Quercus faginea* y *Cephalanthera rubra* con *Lonicera hispanica* y *Paeonia humilis*. (*Cephalanthero rubrae-Quercus fagineae sigmetum*). (Rivas-Martínez, 2011).

Aunque también la zona de estudio se encuentra influenciada debido a su cercanía por la serie 18a denominada: Serie supramediterránea carpetano-ibérico-alcarreña subhúmeda silicícola de *Quercus pyrenaica* (Rivas-Martínez, 1987) que tras la actualización de 2011 pasa a llamarse: Serie climatófila guadarrámica celtibérico-alcarreña y oroibérica silicícola mediterránea pluviestacional oceánica supramediterránea subhúmedo-húmeda de los bosques de *Quercus pyrenaica* y *Luzula forsteri* con *Milium vernale* y *Cistus laurifolius* (*Luzulo forsteri- Quercus pyrenaicae sigmetum*) (Rivas-Martínez, 2011). La identificación de estas dos series de puede ver en la Figura 11.21.



Figura 11.21. Identificación de las series climatófilas de la zona de estudio.

Una vez determinadas cada una de las series que influyen en nuestra zona de estudio, se pasa a describir cada una de ellas.

La serie 19b en su etapa madura o clímax se corresponde con un bosque denso en el que predominan los árboles caducifolios o marcescentes (*Aceri- Quercion fagineae*). Estos bosques suelen estar sustituidos por espinares (*Prunetalia*) y pastizales vivaces en los que abundan caméfitos (*Brometalia, Rosmarinetalia, etc*). Se hallan ampliamente distribuido por las provincias corológicas aragonesa, castellano-maestrazgo-manchega y bética pudiendo sobre ciertos suelos profundos descender al piso meso mediterráneo lo que confiere una gran diversidad florística.

Pese a su óptimo en el piso supramediterráneo pueden descender al meso mediterráneo superior tanto en las umbrías como en las llanuras de suelos profundos. La vocación del territorio es tanto agrícola, ganadera, como forestal, lo que está en función de la topografía, grado de conservación de los suelos y usos tradicionales en las comarcas. (Rivas-Martínez, 1987).

Una vez descrita la serie 19b, se pasa a describir la serie 18a: el grupo de series supramediterráneas silicícolas del roble melojo se hallan muy extendidas por todo el piso de vegetación supramediterráneo, en particular sobre suelos silíceos pobres en bases y áreas de carácter húmedo y subhúmedo.

Tienen su óptimo, dentro de la región Mediterránea, en el cuadrante noroccidental peninsular precisamente en la provincia corológica Carpetano-Ibérico-Leonesa, donde tienen su centro genético y de dispersión numerosas especies características de estos ecosistemas (*Quercus pyrenaica*, *Genista florida*, *Genista cinerea*, *Adenocarpus complicatus*, *Genistella tridentata*, *Erica aragonensis*...).

El clímax de estas series corresponde a robledales densos, bastante sombríos, creadores de tierras pardas con humus tipo mull (*Quercenion pyrenaicae*). Las etapas seriales de sustitución correspondientes a etapas degradadas son: en primer lugar, los matorrales retamoides o piornales (*Gestion florideae*), que prosperan todavía sobre suelos muliformes bien conservados y los brezales o jarales (*Ericenion aragonensis*, *Cistus laurifolius*), donde los suelos tienden a podzolizarse en mayor o menor medida por la influencia de una materia orgánica sin descomponer. Este proceso edáfico se manifiesta preferentemente en los brezales de ombroclimas húmedos y en menor medida en los jarales subhúmedos (Rivas Martínez, 1987).

Las etapas de regresión y bioindicadores correspondientes a esta serie son:

<u>Nombre de la serie:</u>	Carpetano-ibérico-alcarreña subhúmeda del melojo
<u>Árbol dominante:</u>	<i>Quercus pyrenaica</i>
<u>Nombre fitosociológico:</u>	<i>Luzulo-Querceto pyrenaicae sigmetum</i>

- Bosque:

Quercus pyrenaica

Luzula forsteri

Physospermum cornubiense

Geum sylvaticum

- Matorral denso:

Cytisus scoparius

Genista florida

Genista cinerea

Adenocarpus hispanicus

- Matorral degradado:

Cistus laurifolius

Lavandula pedunculata

Arctostaphylos crassifolia

Santolina rosmarinifolia

- Pastizales:

Stipa gigantea

Agrostis castellana

Trisetum ovatum

10.4.2. Vegetación actual

Al ser una cuenca de superficie reducida, no llega a las 4 hectáreas, el inventario se realizó muestreando a pie toda la superficie de la cárcava, recogiendo las especies que allí se encuentran e identificándolas posteriormente en gabinete.

Se puede destacar que en la cárcava se distinguen principalmente tres zonas teniendo en cuenta la cobertura de la vegetación, que son las siguientes: laderas de orientación sur, donde la vegetación es prácticamente nula y de porte herbáceo; laderas de orientación norte donde hay una cobertura de vegetación mayor, también de porte herbáceo y el fondo de la cárcava que presenta una buena cobertura de vegetación e incluso especies de matorrales, que puede ser debido a que es una zona con suelos más profundos y una mayor humedad, puesto que es la zona donde va a parar el agua recogida por la cuenca. La zonificación anteriormente descrita se puede ver en la Figura 11.22.



Figura 11.22. Zonificación de la cárcava en función de la cobertura de vegetación.

Las principales especies vegetales que se han observado en la zona de estudio ordenadas por estratos y familias son las siguientes:

Estrato arbóreo: No hay especies pertenecientes a este estrato.

Estrato arbustivo: Se puede ver en la tabla 11.35.

Tabla 11.35. Especies, familia del estrato arbustivo.

Especie	Familia
<i>Thymus mastigoforus</i>	<i>Lamiaceae</i>
<i>Thymus zygis</i>	<i>Lamiaceae</i>
<i>Linum suffruticosum</i>	<i>Linaceae</i>
<i>Crataegus monogyna</i>	<i>Rosaceae</i>
<i>Prunus spinosa</i>	<i>Rosaceae</i>
<i>Rosa canina</i>	<i>Rosacea</i>

En la tabla 11.36 se muestran las especies y familias del estrato herbáceo.

Tabla 11.36. Especies, familias y abundancia del estrato herbáceo.

Especie	Familia
<i>Centaurea montana</i>	<i>Asteraceae</i>
<i>Scorzonera angustifolia</i>	<i>Asteraceae</i>
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	<i>Brassicaceae</i>
<i>Coronilla minima</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Muscari comosum</i>	<i>Liliaceae</i>
<i>Orchis morio champagne oxi</i>	<i>Orchidaceae</i>
<i>Ophrys lutea</i>	<i>Orchidaceae</i>
<i>Ophrys tenthredinifera</i>	<i>Orchidaceae</i>
<i>Bromus rubens</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Hordeum murinum</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Koeleria vallesiana</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Sanguisorba minor</i>	<i>Rosaceae</i>
<i>Veronica tenuifolia</i>	<i>Scrophulariaceae</i>

11.4.2. Vegetación y erosión

La vegetación juega un papel importante en la erosión debido a que dota de protección al suelo frente a los procesos erosivos. Las principales acciones que realiza la vegetación contra la erosión son las siguientes:

- Intercepta el agua de lluvia antes de que llegue al suelo, reduciendo la erosión que se produce por salpicadura y la compactación del terreno.
- Genera mayor resistencia a la escorrentía haciendo que su velocidad sea menor y por lo tanto aumentando la infiltración.
- El sistema radical de las plantas mejora la capacidad de infiltración edáfica.
- La vegetación gracias a la evapotranspiración extrae agua edáfica, manteniendo el suelo por debajo de la capacidad de campo retrasando así la aparición de escorrentía superficial.
- Supone una barrera física ante deslizamientos.

Todo lo anteriormente descrito contribuye al retraso en la formación de escorrentía superficial durante las precipitaciones y también la reducción de su velocidad e intensidad disminuyendo su capacidad erosiva y de transporte de sedimentos. Un ejemplo de lo anteriormente comentado se puede ver en la Figura 11.23 donde vemos como la vegetación retiene el suelo e impide que se pierda por deslizamientos.



Figura 11.23. Vegetación reteniendo el suelo.

11.5. Medidas de erosión

11.5.1. Determinación de la divisoria de la cuenca de estudio

Para la determinación de la divisoria topográfica de la cuenca de estudio, se utilizó el Modelo Digital del Terreno (MDT) (IGN, 2011). Por otra parte, la divisoria de escorrentía directa se obtuvo mediante el uso de un GPS de precisión centimétrica modelo Leica.

En la zona de estudio, la carencia de arbolado, permite usar este equipo para realizar el trabajo, debido a que la precisión siempre está entorno al milímetro y este equipo permite realizar el levantamiento de la divisoria de escorrentía directa de manera más rápida que si lo realizáramos con una estación total, sin perder precisión.

El método de trabajo consistió en determinar la sección de cierre de la zona de estudio y dejarla marcada con un clavo para poder volver a realizar mediciones con la misma sección de cierre. Una vez marcada, se recorrió el perímetro de la cárcava tomando puntos cada medio metro hasta llegar de nuevo a la sección de cierre. En la Figura 11.24. se puede ver la toma de puntos con el GPS.



Figura 11.24. Toma de puntos mediante GPS, en la divisoria de escorrentía directa.

Una vez recorrida la divisoria, en gabinete mediante los software informáticos ArcMap 10 y AutoCAD Map 3D 2014, se traza la divisoria de escorrentía directa y se calcula su perímetro y superficie. Los resultados obtenidos con ambos programas se comparan y al obtener los mismos se aceptan como válidos.

En la Figura 11.25 se observa la divisoria de escorrentía directa, sobre el mapa del terreno.



Figura 11.25. Divisoria y cauces de la cuenca de estudio. Rojo: Divisoria de la cuenca; Verde: divisoria de escorrentía directa; Azul: principales cauces de la cuenca; Gris: curvas de nivel cada 5 m.

11.5.2. Determinación de la variación del perímetro y la superficie

El objetivo que se persigue es conocer la variación que ha habido de perímetro y de superficie en el tiempo entre mediciones debido a los procesos de erosión.

Pasados aproximadamente 9 meses, se volvió a la zona de estudio y se replanteó la medición de la divisoria de escorrentía directa, partiendo del mismo punto (sección de cierre) y recorriendo el perímetro a pie tomando puntos. Con esta segunda medición se obtuvo la nueva divisoria de escorrentía directa de la cárcava y mediante el programa informático ArcMap 10, se calculó la nueva superficie así como el perímetro respectivamente. En la Figura 11.26 se presenta la divisoria obtenida tras el paso de 8 meses desde la primera medición.

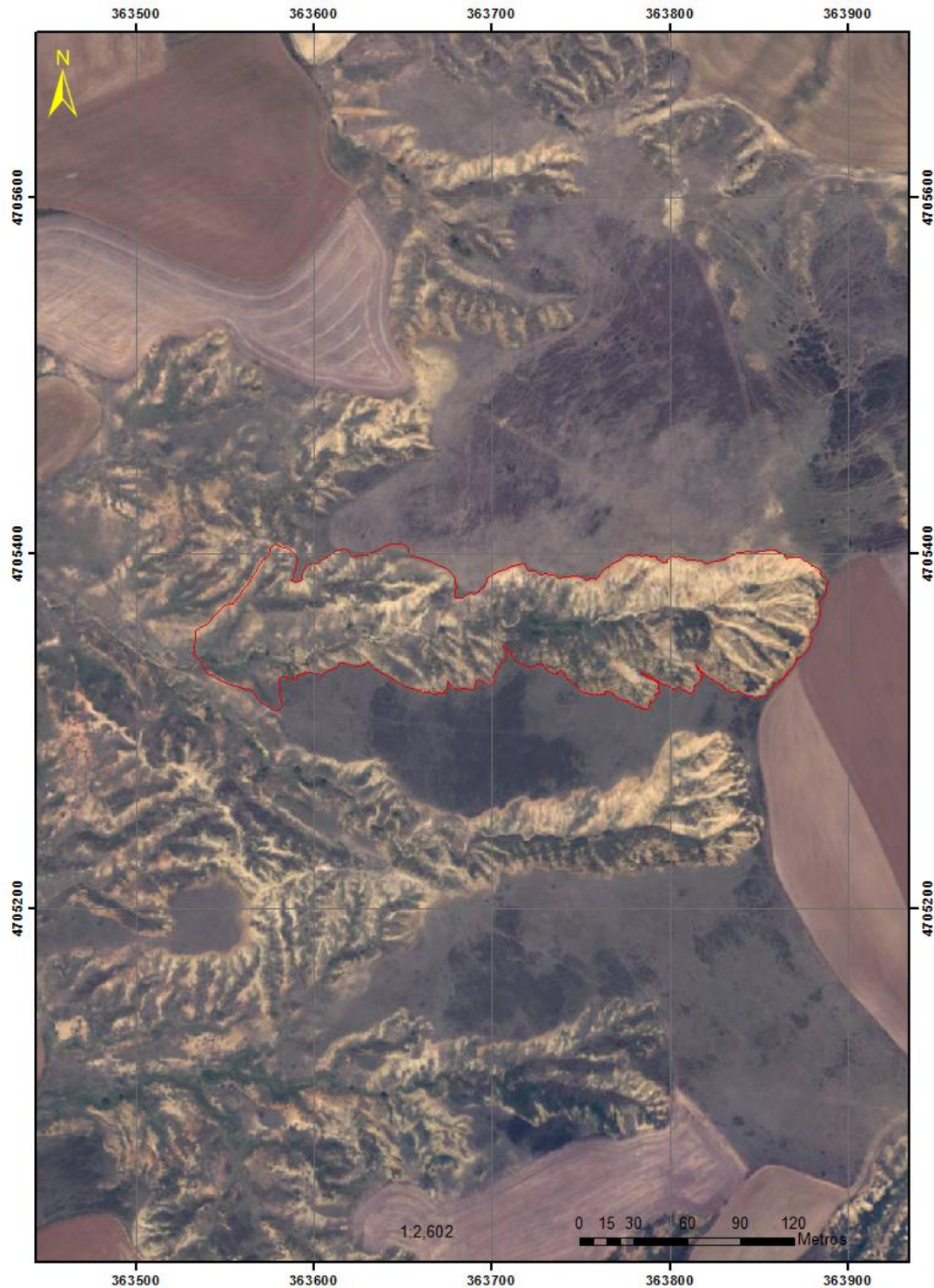


Figura 11.26. Divisoria de escorrentía directa correspondiente a Julio de 2015.

Con las dos divisorias obtenidas, se realiza un comparación, pudiendo observarse en que zonas ha habido avance de la cárcava y mediante el cálculo de sus superficies se puede determinar la cuantía de esos avances. La comparación de las dos divisorias se puede ver en la Figura 11.27.

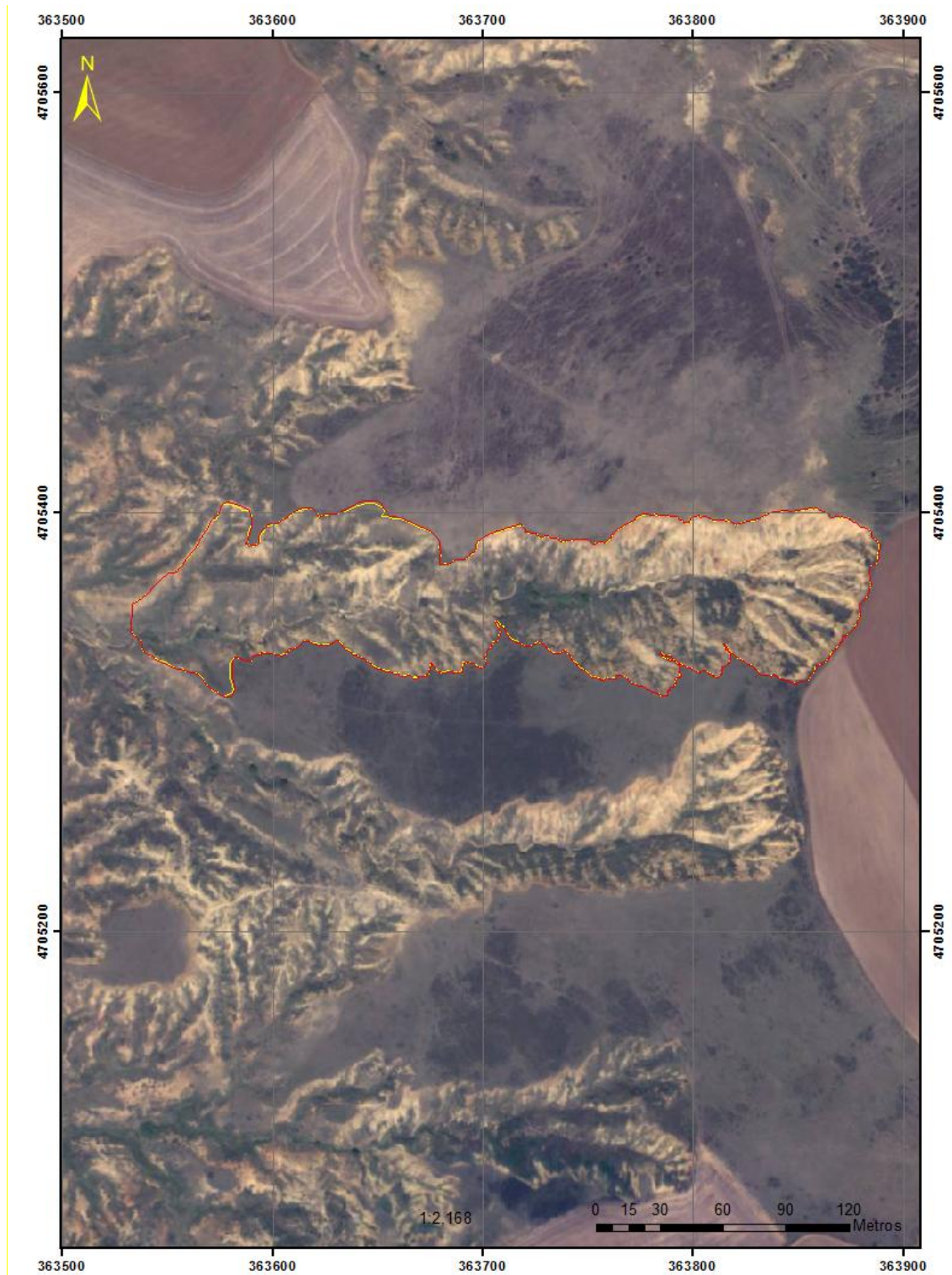


Figura 11.27. Comparación de las divisorias obtenidas en Octubre de 2014 (amarillo) y Julio de 2015 (rojo).

11.5.3. Medidas de la erosión en puntos concretos

Para poder conocer los procesos erosivos que ocurren en la cárcava así como su cuantía se decidió la realización de una serie de perfiles en laderas de diferente longitud cuyo perfil se midió a través de un distanciómetro láser, concretamente del modelo Leica DistoTM D510. En la Figura 11.28. se ve la medición de uno de estos perfiles.



Figura 11.28. Medición de uno de los perfiles.

Al ser la primera vez que se llevaba el método a campo, se decidió realizar varios perfiles de diferentes longitudes y características, con la finalidad de obtener distintas tasas erosivas y posteriormente realizar una evaluación del método así como los ajustes que fueran necesarios para futuras mediciones en ese u otros lugares.

Una vez en campo y evaluando las características de nuestra zona de estudio se decidió la colocación de 13 perfiles, que engloban prácticamente la totalidad de la cárcava.

11.5.4. Determinación de la erosión a través de los perfiles obtenidos

Una vez establecidos y medidos los perfiles, se vuelve a realizar una medición sobre ellos 6 meses y medio después de la primera, con la misma metodología de trabajo, medición que iba a ser la última, pero en el transcurso de este trabajo durante una semana de la primavera se produjeron episodios de lluvia torrenciales y se decidió realizar una tercera medición con el objetivo de ver los fenómenos erosivos que habían producido dichas precipitaciones. Con los datos obtenidos y con el software AutoCAD Map 3D 2014, realizamos la superposición de los perfiles obtenidos para cada una de

las medidas y de esa manera calcular las superficies en las que ha habido erosión, así como en las que ha habido deposición de materiales y posteriormente mediante una serie de cálculos que explicaremos más adelante, llegar a una tasa erosiva.

11.5.5. Datos obtenidos

A continuación se van a presentar los datos de cada sección de control, en cada una de las mediciones. En la Tabla 11.37. se muestran los datos de la sección de control 1.

- Sección de control 1

Tabla 11.37. Datos de la sección 1, para sus correspondientes mediciones.

Fecha 1/12/2014			Fecha 22/6/2015		
Punto	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Punto	Dist. Hor.(d)	Dif. Alt (h)
REF	1.82	0	REF	1.82	0
1	3.922	0.178	1	5.2312	0.3869
2	10.5936	1.0798	2	11.0899	1.5733
3	10.644	1.2576	3	11.2695	1.8057
4	11.5028	1.9354	4	11.6223	2.1423
5	11.9483	2.3391	5	11.8282	2.5071
6	13.7507	2.8482	6	14.6105	3.3028
7	14.9175	3.6298	7	15.6204	3.8591
8	15.7981	4.0441	8	16.5094	4.3452
9	17.4388	4.9424	9	17.4098	4.8545
10	18.0748	5.4004	10	17.9912	5.3655
11	19.3804	5.8385	11	19.8857	6.2268
12	20.1244	6.5137	12	20.2972	6.6915
13	20.4287	6.9069	13	21.231	7.3769
14	21.3653	7.6152	14	21.8094	8.0455
15	21.7912	8.2109	15	22.231	8.5926
16	22.5076	9.0649	16	22.5296	8.9053
17	22.7343	9.2494	17	24.105	9.7674
18	24.3836	10.5242	18	24.2624	10.2925
19	25.032	11.1367	19	25.1178	11.0807
20	25.385	11.6211	20	25.5473	11.5389
21	26.0906	12.2031	21	25.8884	11.809
22	27.3441	12.9684	22	27.4245	12.8293
23	28.0804	13.3886	23	29.468	13.8552
24	29.2346	13.9584	24	30.184	14.5183
25	29.7384	14.407	25	31.4066	15.3513
26	30.9922	15.2817	26	31.8105	15.7034
27	31.5742	15.8349	27	32.1462	15.942
28	32.0321	16.1728	28	32.4	16.37
29	32.4	16.37			

- Sección de control 2

En la Tabla 11.38 se presentan los datos correspondientes a esta sección.

Tabla 11.38. Datos de la sección 2, para sus correspondientes mediciones.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/05/2015		Fecha: 22/06/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor (d)	Dist. Alt (h)	Dist. Hor (d)	Dist. Alt (h)
REF	1.8354	0	1.8354	0	1.8354	0
1	1.8636	0.0785	2.233	0.1915	3.8898	0.8482
2	3.4579	0.6567	2.6771	0.2098	4.1547	0.9764
3	3.8899	0.8938	2.8218	0.4385	4.3334	1.0819
4	4.3396	1.1624	2.9644	0.485	4.6992	1.2315
5	5.0719	1.4779	3.2076	0.6961	5.0368	1.4175
6	5.6367	1.8475	3.8765	0.783	5.4474	1.6526
7	6.8315	2.401	4.0343	1.0176	5.9472	1.785
8	7.8043	2.8757	4.8156	1.2697	6.7893	2.2895
9	8.7176	3.4909	5.11	1.467	8.2088	2.9997
10	10.2394	4.4209	5.6396	1.7294	8.8604	3.4971
11	10.4511	4.5199	6.0642	1.9906	9.6975	3.971
12	11.3481	4.9477	6.8833	2.0238	11.4689	4.8665
13	11.691	5.2733	7.8177	2.7871	11.8323	5.1973
14	12.0027	5.5049	8.763	3.328	12.6878	5.8353
15	12.3741	5.9419	9.1097	3.7275	13.2488	6.3256
16	13.0417	6.4309	11.2441	4.6949	14.266	7.0384
17	13.5053	6.8116	11.8028	5.1744	15.842	7.6959
18	13.6088	7.0951	12.8721	5.9887	16.5303	8.8344
19	15.1012	7.8791	13.5697	6.5859	18.8273	9.8548
20	15.5576	8.1367	14.6389	7.2574	20.1918	10.7075
21	17.6812	9.1782	15.1348	7.7175	20.9478	11.3872
22	18.7236	9.8371	15.2431	7.9439	21.06	11.57
23	20.2114	10.7787	17.7057	9.1391		
24	20.722	11.2405	18.7713	9.7954		
25	21.06	11.57	20.0707	10.5304		
26			20.652	11.0826		
27			20.8888	11.2834		
28			21.06	11.57		

- Sección de control 3

A continuación en la Tabla 11.39 se exponen los datos del perfil 3.

Tabla 11.39. Datos correspondientes de la sección 3.

Fecha: 1/12/2014

Punto	Dist. Horizontal (d)	Dif. Altura (h)
REF	1.8296	0
1	2.4056	0.1128
2	3.3546	0.5759
3	5.5471	2.0183
4	7.0647	2.728
5	7.6483	3.133
6	7.9221	3.4727
7	8.6228	3.9575
8	9.7216	4.5892
9	10.9246	5.3107
10	10.9805	5.4262
11	12.0841	5.9201
12	14.2164	6.8792
13	14.5319	7.1628
14	15.8314	7.8208
15	16.2948	8.1734
16	16.9786	8.5041
17	17.4679	8.8658
18	17.8608	9.268
19	19.1479	9.9108
20	21.238	11.0104
21	22.246	11.7059
22	22.8902	12.1997
23	24.7055	13.5997
24	25.6113	14.3704
25	26.7409	15.3608
26	27.09	15.8183
27	28.0633	16.707
28	28.2229	17.1705
29	31.0787	19.2421
30	33.17	21.28
31	33.9792	22.0803

La sección de control 3 no se pudo volver a medir debido a que durante el periodo entre mediciones se cubrió completamente de vegetación, y el distanciómetro láser sobre vegetación pierde precisión, por lo que los resultados obtenidos no iban a ser válidos.

En la Figura 11.29 se muestra una imagen de este perfil completamente colonizado por la vegetación e impidiendo su segunda medida con resultados de garantía.



Figura 11.29. Estado de la sección 3, en el momento de la segunda medición.

- Sección de control 4

En la Tabla 11.40. se ofrecen los datos correspondiente a esta sección.

Tabla 11.40. Datos de la sección de control 4 para cada una de sus mediciones.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2105	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	5.96	0	5.96	0	5.96	0
1	6.265	0.1948	6.5907	0.4605	6.3708	0.1981
2	6.5212	0.4215	6.7641	0.5728	6.7025	0.456
3	6.8667	0.6785	6.8794	0.6953	7.1071	0.7773
4	7.2058	0.8212	7.2344	0.9768	7.3279	1.094
5	7.8464	1.4646	7.3751	1.1236	7.8521	1.3953
6	8.0808	1.6309	7.6085	1.3143	8.5198	1.9316
7	8.2505	1.7593	7.912	1.4875	9.1372	2.4415
8	8.4341	1.9074	8.1483	1.6729	9.8252	3.0379
9	8.5379	2.0645	8.4075	1.9679	10.214	3.4979
10	8.7179	2.2323	8.7957	2.3396	10.5336	4.181
11	9.046	2.4366	9.1628	2.5517	10.9249	4.6783
12	9.4738	2.7072	9.6399	3.0145	11.5164	5.3634
13	9.6677	2.8947	9.967	3.3053	13.0588	6.148
14	10.2356	3.5175	10.2433	3.717	14.3501	6.9828
15	10.4561	3.9565	10.4575	4.0551	14.9766	7.6474

Tabla 11.40 (cont.). Datos de la sección de control 4 para cada una de sus mediciones

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2105	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
16	11.0247	4.5537	10.9174	4.7048	16.3222	8.5115
17	12.4524	5.6038	11.1846	5.2379	17.3239	9.3449
18	12.8523	6.0819	12.4982	5.836	18.4204	10.0439
19	14.4485	6.92	13.88	6.2764	19.317	10.9423
20	15.1053	7.3638	14.2887	6.9741	19.5809	11.2935
21	16.0095	8.0144	15.1024	7.7495	21.8364	12.641
22	16.9275	8.8028	16.4897	8.7048	22.4344	13.2196
23	17.9975	9.632	16.7397	9.0569	26.8546	15.7232
24	18.8096	10.2532	18.6149	10.1663	27.768	16.3734
25	19.3445	10.6485	19.4693	10.9692	28.9003	17.2682
26	19.7675	11.181	19.8074	11.4428	30.3627	18.3957
27	19.9076	11.613	21.7752	12.592	30.7243	18.6623
28	21.8691	12.7633	22.4268	13.2949	30.7458	18.7554
29	22.2692	13.3401	26.3667	15.1638	30.8334	18.88
30	23.3033	13.77	26.7163	15.49		
31	26.578	15.4531	29.2268	17.2475		
32	27.9607	16.342	30.5527	18.4142		
33	29.0232	17.1912	30.8334	18.88		
34	29.2112	17.6361				
35	30.4636	18.7171				
36	30.8334	18.88				

- Sección de control 5

En la Tabla 11.41 se muestran los datos correspondientes a la sección de control 5, donde la medida correspondiente al mes de Mayo no se pudo realizar debido a que la vegetación del fondo de la cárcava no permitió la identificación del clavo de referencia. En la medición del mes de Junio si se identificó dicho clavo, pudiendo medir la sección de manera totalmente normal. En la Figura 11.30 muestra la vegetación de la cárcava y el clavo después de desbrozar.



Figura 11.30. Desbroce e identificación del clavo de referencia.

Tabla 11.41. Datos de la sección 5, para cada una de las medidas.

Fecha: 1/12/2014			Fecha: 22/6/2015		
Punto	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Punto	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	5.9609	0	REF	5.9609	0
1	7.8747	0.922	1	7.9427	0.8985
2	8.1893	1.223	2	8.173	1.1368
3	8.5135	1.6553	3	8.5681	1.4931
4	9.2412	2.0912	4	8.841	1.6866
5	9.4334	2.2566	5	9.3479	2.0768
6	9.626	2.599	6	9.7531	2.5847
7	9.8455	2.9153	7	10.1339	3.234
8	10.1593	3.3544	8	10.3826	3.5746
9	10.3582	3.6931	9	11.2293	3.8945
10	10.8376	4.054	10	13.347	4.5156
11	11.8803	4.5284	11	14.9909	5.0099
12	13.0338	5.1183	12	17.9786	5.9543
13	17.046	5.7922	13	19.2072	6.9196
14	18.4244	6.2571	14	19.6455	7.7128
15	19.0073	6.7406	15	20.0625	8.7277
16	19.519	7.1176	16	20.7854	9.485
17	19.8465	7.7684	17	21.7493	10
18	20.0556	8.1819	18	23.9725	10.9409
19	20.6567	9.2572	19	25.1848	12.0079
20	21.7296	10.0458	20	25.7298	12.6904
21	24.3216	10.9683	21	26.5676	13.5164
22	24.6213	11.4878	22	27.4613	14.2028
23	25.1673	12.1699	23	28.8858	15.3535
24	25.8095	12.9508	24	29.8601	16.1846
25	26.6465	13.7507	25	30.9891	17.2814
26	27.9351	14.6358	26	31.4511	17.9531
27	29.1769	15.5778	27	32.3699	18.8663
28	29.9164	16.541	28	33.2829	19.767
29	31.2067	17.6028	29	33.7377	20.2758
30	31.5512	18.1398	30	34.2846	20.8915
31	32.1579	18.6836	31	34.5554	21.4614
32	32.3915	19.3252			
33	33.1481	20.0803			
34	34.5156	21.3926			
35	34.5554	21.4614			

- Sección de control 6

En la Tabla 11.42. se presentan los datos correspondientes a las mediciones de esta sección.

Tabla 11.42. Datos de la sección 6, para cada una de sus mediciones.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/05/2015		Fecha: 22/06/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	1.122	0	1.122	0	1.122	0
1	2.991	0.3196	2.84	0.224	2.6861	0.2029
2	3.227	0.4245	2.8818	0.2261	3.1517	0.3907
3	3.5797	0.6445	2.9827	0.3316	3.3458	0.493
4	3.9785	0.9051	3.1855	0.4034	3.5959	0.6443
5	4.2589	1.1042	3.3552	0.51	3.9605	0.8623
6	4.4652	1.2971	3.5333	0.5855	4.1893	1.0701
7	4.6988	1.6313	3.6382	0.6672	4.4008	1.2848
8	4.969	1.7917	3.8838	0.7893	4.5587	1.5224
9	5.1512	1.9969	4.1036	1.0509	4.8763	1.7383
10	5.3274	2.1827	4.416	1.3058	5.1388	1.9371
11	5.5181	2.3157	4.5134	1.5042	5.3801	2.1697
12	5.6869	2.3727	4.798	1.6741	5.7896	2.5596
13	5.8653	2.7069	5.157	1.9554	6.0231	2.8585
14	5.9409	2.8398	5.3588	2.1587	6.0794	3.1167
15	5.9897	2.9573	5.5759	2.3523	6.1346	3.2055
16	6.0246	3.1357	5.8468	2.5916	6.1606	3.4588
17	6.0673	3.2585	6.0139	2.8387	6.1702	3.6116
18	6.0579	3.4541	6.0838	3.0122	6.2921	3.7681
19	6.1063	3.6463	6.132	3.2358	6.7604	3.98
20	6.282	3.8281	6.1817	3.4255	7.18	4.25
21	7.18	4.25	6.1654	3.6354		
22			6.5563	3.9077		
23			7.18	4.25		

La Figura 11.31 muestra esta sección de control.



Figura 11.31. Vista la sección de control 6.

- Sección de control 7

En la Tabla 11.43 se exponen los datos del perfil 7.

Tabla 11.43. Datos de la sección de control 7 para las mediciones realizadas.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	3.48	0	3.48	0	3.48	0
1	3.6908	0.2326	3.9209	0.4266	3.8053	0.2962
2	3.9558	0.5348	4.0595	0.5339	3.8412	0.3377
3	4.3548	0.7063	4.1275	0.6104	3.8869	0.4027
4	4.7898	0.9663	4.392	0.6762	3.935	0.5002
5	5.3786	1.2677	4.5894	0.7988	4.0594	0.5748
6	5.661	1.4336	4.64	0.9494	4.3658	0.6935
7	6.3967	1.8624	4.879	1.1322	4.815	0.9413
8	7.0694	2.4337	5.6395	1.3342	5.2166	1.1523
9	7.9185	3.1844	6.2237	1.6831	5.3847	1.2567
10	8.3235	3.5662	6.6291	2.0283	6.2439	1.7308
11	8.6589	3.9763	7.1814	2.4178	6.65	1.9643
12	8.9206	4.3976	7.555	2.8235	7.1067	2.3935
13	9.1703	4.8815	8.1769	3.329	7.6607	2.7762
14	9.6953	5.3664	8.4533	3.4692	8.417	3.5211
15	10.3936	5.8462	8.5671	3.7606	8.8087	4.0771
16	10.868	6.4557	8.8795	4.0859	9.0764	4.4128
17	11.851	7.2528	9.1448	4.5279	9.4716	5.0009
18	12.3459	7.6932	9.7909	5.2727	10.0932	5.554
19	12.9903	8.3936	10.5378	5.8742	10.4812	5.86
20	13.1477	8.4452	11.0638	6.3815	11.0669	6.4654
21	14.4252	9.4987	11.7794	6.9686	11.758	6.9671
22	15.206	10.0757	12.5941	7.6255	12.399	7.4802
23	15.4289	10.4337	12.9341	8.0551	12.9901	8.0852
24	15.6969	10.7195	13.4013	8.4554	13.3175	8.3887
25	15.86	10.85	14.1057	9.0474	13.7136	8.6973
26			15.3514	9.9839	14.2066	9.1108
27			15.6377	10.301	14.9112	9.614
28			15.817	10.4852	15.2991	9.9379
29			15.86	10.85	15.5503	10.2652
30					15.81	10.46
31					15.86	10.85

- Sección de control 8

En la Tabla 11.44 se pueden ver los datos de esta sección.

Tabla 11.44. Datos de la sección de control 8 para las mediciones realizadas.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	0.9528	0	0.9528	0	0.9528	0
1	4.8577	1.3913	3.1098	0.9602	2.9143	0.8664
2	8.8814	3.2857	3.4001	1.0653	3.1832	1.0296
3	9.1648	3.7185	3.8665	1.1876	6.1254	2.4958
4	9.201	3.8479	4.8264	1.3435	7.9426	3.0906
5	10.0823	4.3189	5.0515	1.5221	9.1316	3.2748
6	10.6517	4.983	5.5377	1.8412	9.2703	3.5504
7	11.1828	5.6506	5.5835	2.0604	9.9379	3.8965
8	12.004	6.2489	5.9255	2.2893	10.1247	4.2672
9	12.7363	6.8907	8.0582	2.8848	10.2019	4.3404
10	13.3696	7.2994	9.1436	3.3375	10.797	4.7729
11	13.8411	7.6624	9.1946	3.3969	11.0621	5.3434
12	14.6623	8.3452	9.5519	3.6583	11.3861	5.5906
13	15.3243	9.164	9.7623	3.9443	11.7929	5.9582
14	15.4971	9.3429	10.0516	4.1891	11.9761	6.1324
15	17.2859	10.5618	10.3058	4.4937	12.4977	6.5591
16	17.46	10.76	10.7241	4.8854	13.2806	7.1699
17			11.0505	5.2408	13.7951	7.5664
18			11.4701	5.5541	14.4704	8.1182
19			11.8724	5.9629	14.9384	8.5217
20			12.3436	6.3931	15.3103	8.9125
21			13.0453	6.9508	15.5564	9.2006
22			14.1494	7.7895	15.5869	9.2166
23			14.7311	8.2458	15.8596	9.4579
24			15.2326	8.7008	16.8863	10.1923
25			15.4784	9.0639	17.46	10.76
26			16.0319	9.4875		
27			17.3709	10.3415		
28			17.4	10.48		
29			17.46	10.76		

- Sección de control 9

La Tabla 11.45 muestran los datos correspondientes a esta sección.

Tabla 11.45. Datos de la sección de control 9 para las mediciones realizadas.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	3.1501	0	3.1501	0	3.1501	0
1	4.0811	0.5914	3.2875	0.0518	4.2095	0.6989
2	4.3434	0.8285	3.4396	0.1664	4.2995	0.7707
3	4.7893	1.2494	3.5907	0.2181	4.3758	0.8381
4	5.2692	1.8155	3.7362	0.2914	4.4236	0.9481
5	5.6652	2.3854	3.9509	0.4684	4.5328	1.0435
6	6.1002	2.7591	4.026	0.666	4.7163	1.1372
7	6.6618	3.3275	4.3467	0.8861	4.8077	1.2251
8	6.7459	3.5938	4.5193	1.0196	5.0537	1.4553
9	7.2743	4.0685	4.7355	1.2108	5.1907	1.6439
10	7.4648	4.3534	4.9187	1.3959	5.3307	1.8477
11	7.9965	4.8059	5.18	1.6418	5.4625	2.0691
12	8.5382	5.2543	5.2902	1.8986	5.7211	2.4083
13	8.9184	5.6444	5.6263	2.1318	6.1216	2.666
14	9.3444	6.0425	5.7787	2.463	6.4201	2.9998
15	10.0082	6.769	6.2684	2.8909	6.5945	3.2542
16	10.4421	7.1405	6.5224	3.1609	6.7793	3.5362
17	11.0631	7.7901	6.5419	3.3726	7.0389	3.7974
18	11.9876	8.3544	7.1234	3.8092	7.485	4.2307
19	12.3986	8.8294	7.5128	4.2258	7.7378	4.4901
20	12.7307	9.1405	8.1038	4.8849	8.288	5.0419
21	13.0863	9.4718	8.6403	5.2983	8.9893	5.5949
22	13.3216	9.5912	9.4851	6.1083	9.4534	6.0701
23			10.2833	6.8552	10.2729	6.7768
24			10.4422	7.145	10.4482	7.136
25			11.208	7.7154	11.2586	7.736
26			12.4542	8.6358	11.9675	8.2338
27			12.7828	8.9388	12.6797	8.805
28			13.0582	9.1967	12.8347	8.9733
29			13.2156	9.37	13.0894	9.2221
30			13.3216	9.5912	13.3216	9.5912

- Sección de control 10

En la Tabla 11.46 se ofrecen los datos de esta sección.

Tabla 11.46. Datos para cada una de las mediciones de la sección de control 10.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/05/2015		Fecha: 22/06/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	3.529	0	3.529	0	3.529	0
1	4.8412	0.6435	5.1866	0.8435	4.5226	0.6307
2	5.1834	0.8711	5.4273	1.0438	5.2008	0.7957
3	5.5825	1.2674	5.57	1.2116	5.5198	1.0513
4	6.0836	1.7545	5.7151	1.3485	5.8861	1.3701
5	6.7626	2.1596	6.1154	1.7083	6.4297	1.8406
6	9.0605	3.2724	6.5753	2.001	7.9945	2.4986
7	9.6123	3.7072	7.318	2.4099	8.9396	2.9465
8	10.3109	4.3463	9.0544	3.1509	9.1666	3.2875
9	10.96	4.9496	9.3238	3.44	9.8101	3.7531
10	11.6306	5.5006	10.0226	3.9621	10.2423	4.1691
11	11.6563	5.6753	10.486	4.4098	11.0513	4.8966
12	11.9699	6.2902	11.1434	5.0007	11.7337	5.6253
13	12.2448	6.6914	11.6957	5.6091	11.9352	6.0754
14	12.6373	7.1325	11.8619	5.9653	12.4961	6.7792
15	13.1191	7.6414	12.4971	6.7655	12.8801	7.1605
16	13.8539	8.0574	12.8556	7.233	13.6835	7.762
17	14.8828	8.7699	13.3588	7.6518	14.1491	8.0478
18	15.5873	9.4802	14.887	8.5371	15.408	8.9245
19	16.7545	10.2193	15.4167	9.0576	15.6372	9.2186
20	17.3421	10.8404	16.4451	9.8183	16.9003	9.9721
21	17.5427	11.1886	17.163	10.4455	17.6753	10.8984
22	17.5047	11.5431	17.576	11.1136	17.7441	11.477
23	17.7191	11.9485	17.7468	11.646	18.0912	11.9357
24	18.4147	12.6998	18.0572	12.0282	18.4284	12.3735
25	18.8804	13.1707	18.7091	12.7158	19.0414	12.9342
26	19.3833	13.7474	19.3323	13.3575	19.5309	13.4654
27	19.7213	14.2335	19.8197	14.0267	19.9393	13.9396
28	20.6008	14.9556	20.6482	14.7782	20.183	14.2495
29	20.6864	15.0478	23.9705	17.0507	21.1105	14.9624
30	25.7057	18.5355	25.8789	18.5605	24.3098	17.1069
31	25.8203	18.6992	25.92	18.82	25.6981	18.1095
32	25.92	18.82			25.92	18.82

- Sección de control 11

En la Tabla 11.47 se pueden ver los datos correspondientes a este perfil.

Tabla 11.47. Datos para cada una de las mediciones de la sección de control 11.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	0.1956	0	0.1956	0	0.1956	0
1	1.8962	0.3932	3.4882	0.9536	0.7362	0.1076
2	9.5955	4.3131	3.6654	1.1173	1.5766	0.284
3	11.1591	5.6804	3.7646	1.2289	8.2302	3.7955
4	11.6326	6.0172	4.1517	1.52	10.3425	5.0166
5	12.4426	6.5898	4.6213	1.7572	11.0093	5.5034
6	13.1183	7.2435	4.6579	1.9313	11.4396	5.7555
7	13.7918	7.6768	5.6916	2.3366	11.8012	6.0011
8	14.4016	8.1978	6.4807	2.7437	12.2492	6.3217
9	14.6634	8.5272	7.0752	3.0437	12.6169	6.6334
10	14.9317	8.851	7.7984	3.4358	12.9413	6.8845
11	15.5384	9.2687	8.618	4.0299	13.2512	7.1521
12	16.0025	9.8587	10.3027	4.9073	13.6242	7.4207
13	16.7546	10.5875	11.5093	5.7113	14.069	7.7489
14	17.2962	11.1544	12.497	6.3672	14.4965	8.0972
15	17.8056	11.6716	13.2594	7.0258	14.7842	8.4057
16	18.2406	12.1504	13.9016	7.4745	15.0784	8.7255
17	19.2059	12.9736	14.961	8.3567	15.6477	9.3156
18	20.479	13.8518	15.4454	8.8954	16.0232	9.7068
19	20.66	14.05	16.0061	9.3023	16.4123	10.0925
20			16.4808	9.7539	16.7471	10.404
21			17.1351	10.3686	17.5307	11.2571
22			17.5821	10.972	17.964	11.6546
23			17.9257	11.3261	17.9803	11.721
24			18.3395	11.785	18.5418	12.2665
25			19.1113	12.38	19.1632	12.9292
26			20.66	14.05	19.6985	13.072
27					20.66	14.05

- Sección de control 12

En la Tabla 11.48 se muestran los datos de la presente sección.

Tabla 11.48. Datos correspondientes a las mediciones de la sección de control 12.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha: 16/5/2015		Fecha: 22/6/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	2.5	0	2.5	0	2.5	0
1	2.9321	0.244	2.8477	0.2016	2.8596	0.1779
2	3.0147	0.334	2.9527	0.2696	2.9296	0.2432
3	3.0723	0.4729	3.0126	0.3621	3.0091	0.3293
4	3.158	0.6901	3.0399	0.4342	3.0593	0.4577
5	3.2276	0.8695	3.0705	0.5153	3.1151	0.6211
6	3.3322	1.063	3.0857	0.5829	3.1865	0.7619
7	3.4341	1.2568	3.1462	0.6888	3.2293	0.8671
8	3.5567	1.4986	3.176	0.7487	3.2924	0.9899
9	3.6629	1.537	3.2033	0.836	3.4129	1.1572
10	3.9329	1.7508	3.2491	0.935	3.5006	1.2777
11	4.0796	1.917	3.3188	1.058	3.5325	1.4532
12	4.1305	2.0827	3.4155	1.179	3.7718	1.5157
13	4.2952	2.2677	3.507	1.3	3.9466	1.7672
14	4.5216	2.6505	3.7164	1.6063	4.114	1.9413
15	4.7868	2.9367	3.9104	1.7423	4.2191	2.1384
16	4.7974	3.0845	4.0346	1.8668	4.4782	2.4476
17	5.1255	3.2742	4.1285	2.0378	4.5221	2.6789
18	5.2834	3.3676	4.1635	2.1731	4.8198	2.9297
19	5.4068	3.4244	4.3981	2.3712	4.8316	3.0605
20			4.516	2.5945	5.4068	3.4244
21			4.732	2.8254		
22			4.8153	3.0383		
23			5.0783	3.2387		
24			5.397	3.4148		
25			5.4068	3.4244		

- Sección de control 13

La Tabla 11.49 muestra los resultados de esta sección.

Tabla 11.49. Datos correspondientes a la sección 13 para sus respectivas mediciones.

Punto	Fecha: 1/12/2014		Fecha 16/5/2015		Fecha: 22/6/2015	
	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)	Dist. Hor. (d)	Dif. Altura (h)
REF	2.1089	0	2.1089	0	2.1089	0
1	2.3087	0.1526	2.1914	0.1699	2.1282	0.0808
2	2.4475	0.3015	2.327	0.28	2.2173	0.1608
3	2.6326	0.4837	2.4744	0.4123	2.5199	0.4004
4	2.8168	0.6824	2.6577	0.5973	2.7879	0.6214
5	3.0035	0.8643	2.8131	0.7494	2.9316	0.7917
6	3.1578	1.0221	2.989	0.925	3.2002	1.1319
7	3.3309	1.2213	3.2238	1.1568	3.4976	1.3507
8	3.4899	1.393	3.4286	1.4056	3.544	1.4995
9	3.6631	1.5719	3.6731	1.6665	3.816	1.7579
10	3.8898	1.8084	4.0327	2.0425	4.0379	1.9495
11	4.046	1.9481	4.4132	2.3903	4.4456	2.4238
12	4.2007	2.1595	4.6343	2.6748	4.7376	2.8387
13	4.4816	2.5257	4.7952	2.8622	4.9938	3.2546
14	4.6493	2.7339	4.8903	3.0388	5.218	3.5857
15	4.7725	2.9066	4.9387	3.1703	5.3554	3.8094
16	4.8762	3.1125	5.118	3.3998	5.5764	4.1565
17	5.0309	3.3435	5.3383	3.7997	5.7156	4.3674
18	5.2427	3.6519	5.6583	4.2287	5.8279	4.6867
19	5.3924	3.8519	5.9931	4.8473	5.909	4.7978
20	5.5222	4.1223	6.0742	5.1607	5.9398	4.8112
21	5.6808	4.3724	6.16	5.4958	5.9993	4.8321
22	5.8868	4.6724			6.05	5.14
23	5.9035	5.0354			6.16	5.4958
24	5.9435	5.2116				
25	5.9502	5.2757				
26	6.16	5.4958				

11.5.6. Comparación de los perfiles obtenidos

En este apartado, se van a presentar los perfiles que se han obtenido con los datos anteriormente presentados, mediante la superposición de cada uno de los perfiles hallados para cada fecha de medición, así como las áreas de erosión y deposición respectivamente y su valor. Como se realizaron tres mediciones, podemos tener tres posibles comparaciones de los perfiles obtenidos; la correspondiente al periodo Diciembre-Mayo (Periodo 1-2); la de Diciembre-Junio (Periodo 1-3) y la correspondiente a Mayo-Junio (Periodo 2-3).

- Sección de control 1

- Periodo 1-3

Para esta sección, solo podemos mostrar esta comparación debido a que en la medida del mes de Mayo se cometió un error en la medición y se tuvo que invalidar los datos obtenidos en ella.

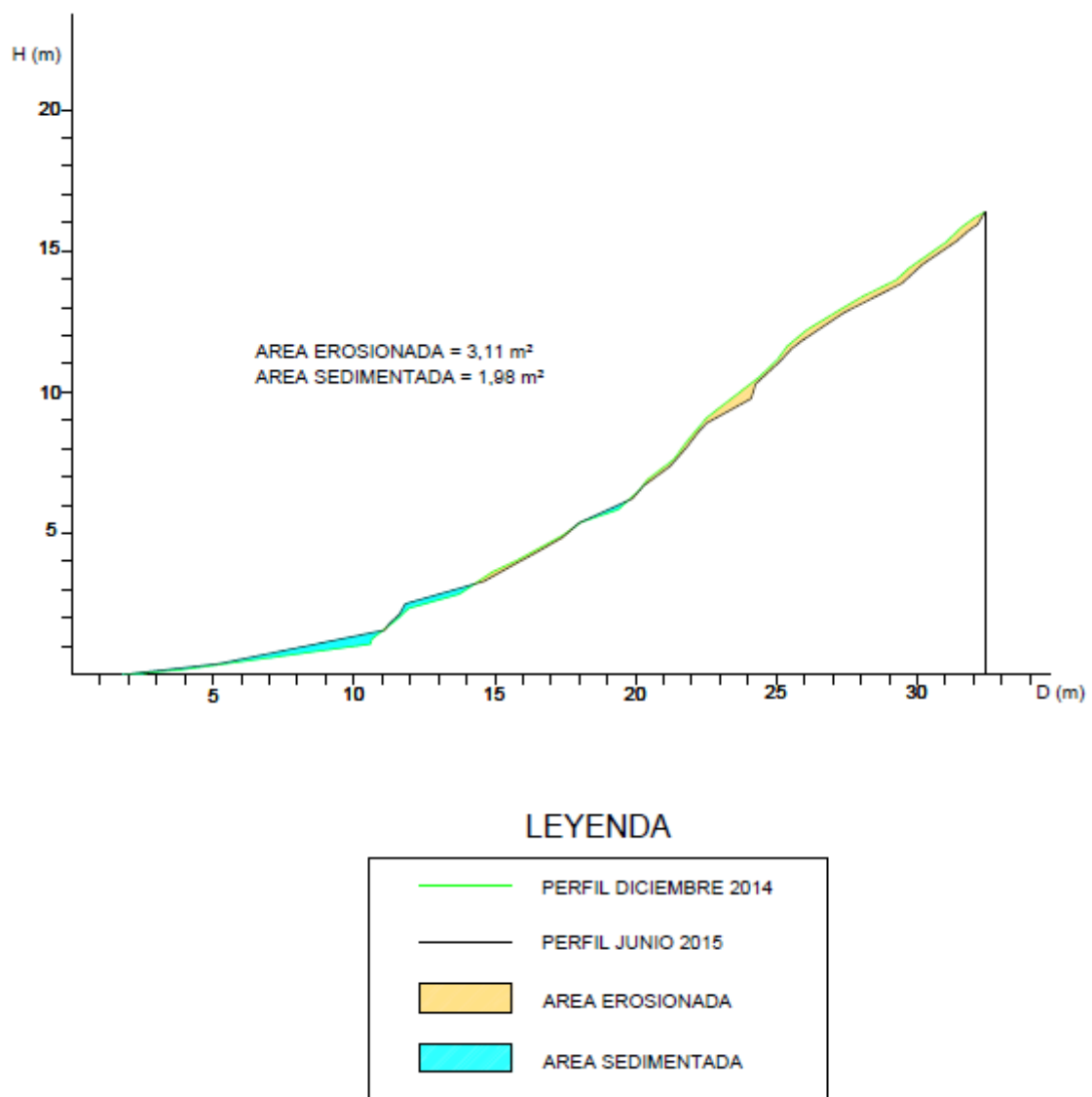


Figura 11.32. Comparación de perfiles del periodo 1-3 en la sección 1.

- Sección de control 2
- Periodo 1-2

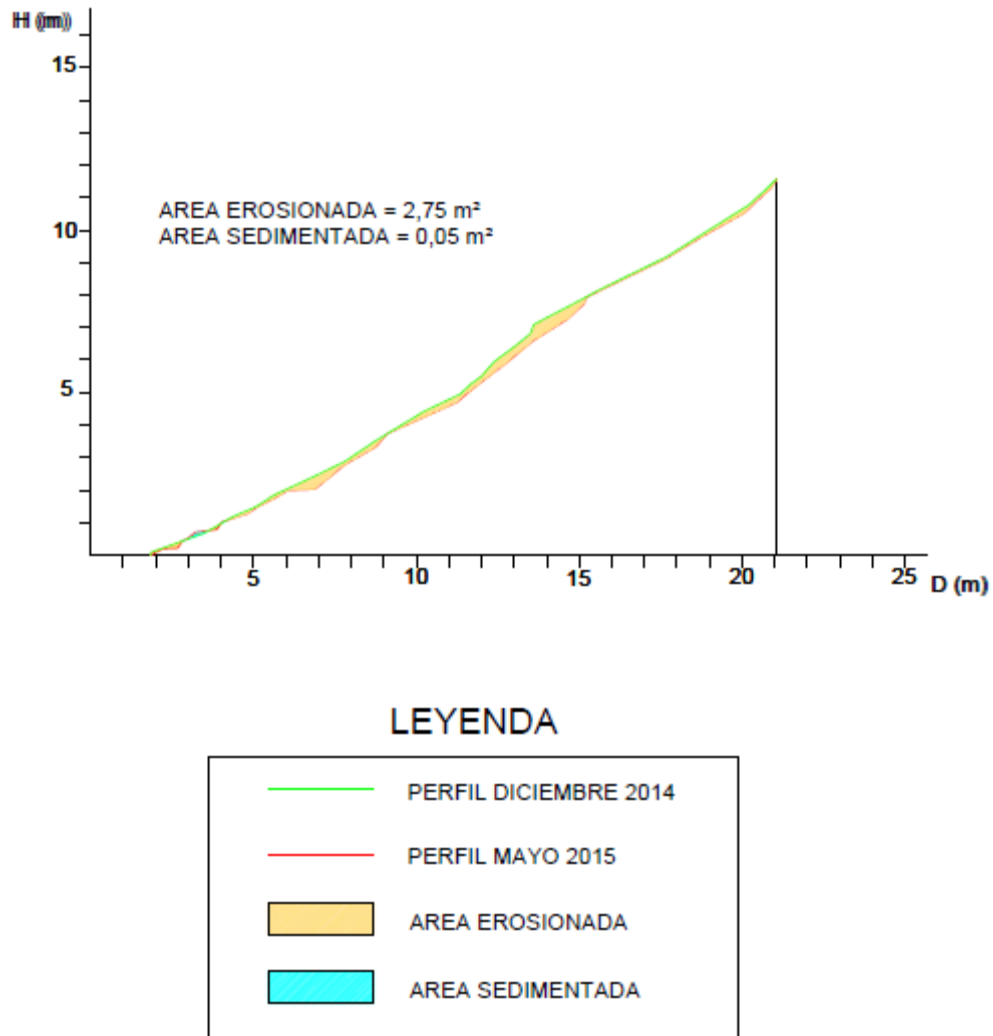
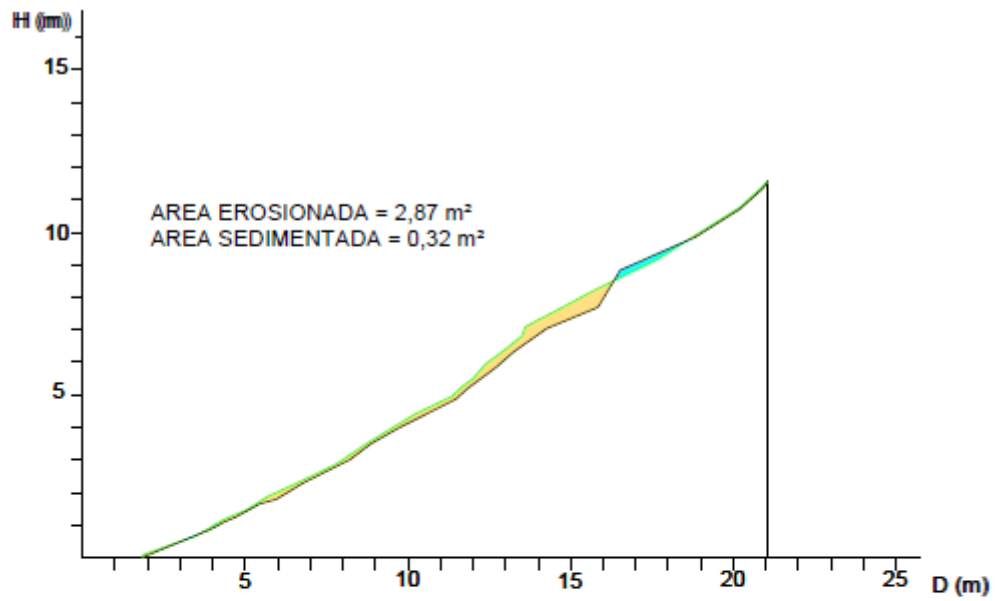


Figura 11.33. Comparación de perfiles del periodo 1-2.

- Periodo 1-3



LEYENDA

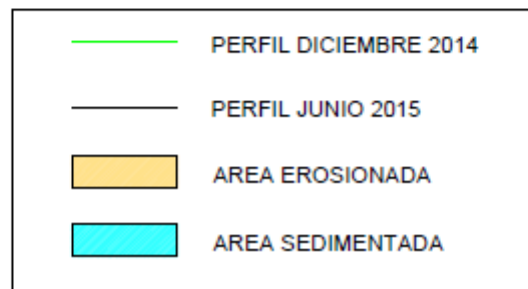
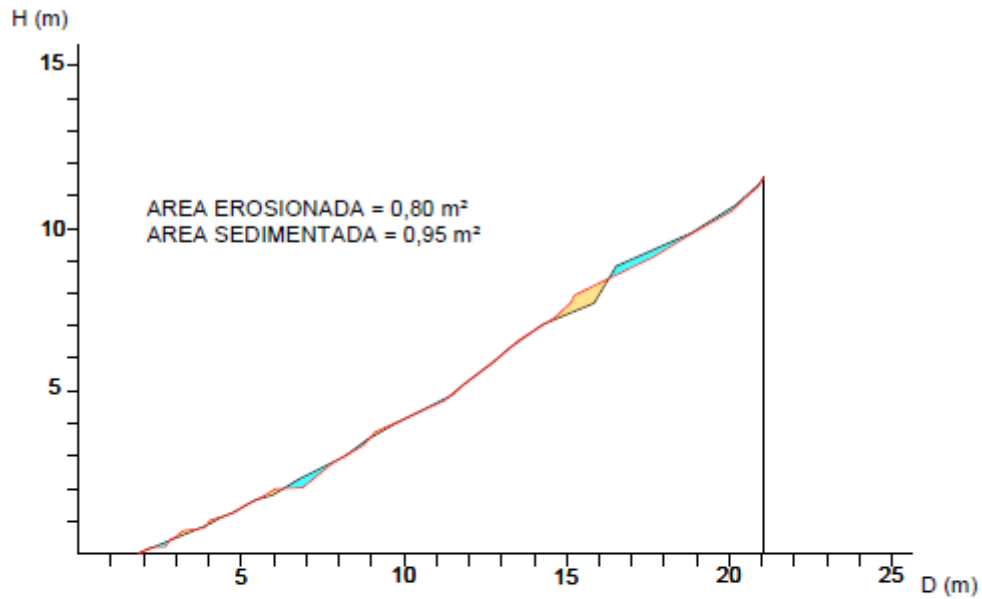


Figura 11.34. Comparación de perfiles del periodo Diciembre-Junio.

- Periodo 2-3



LEYENDA

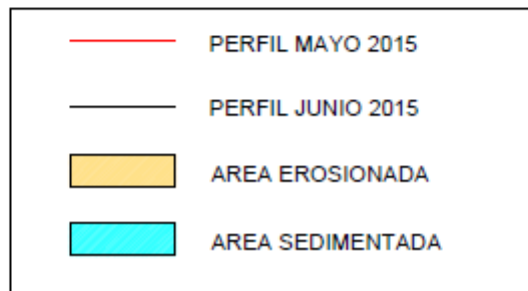


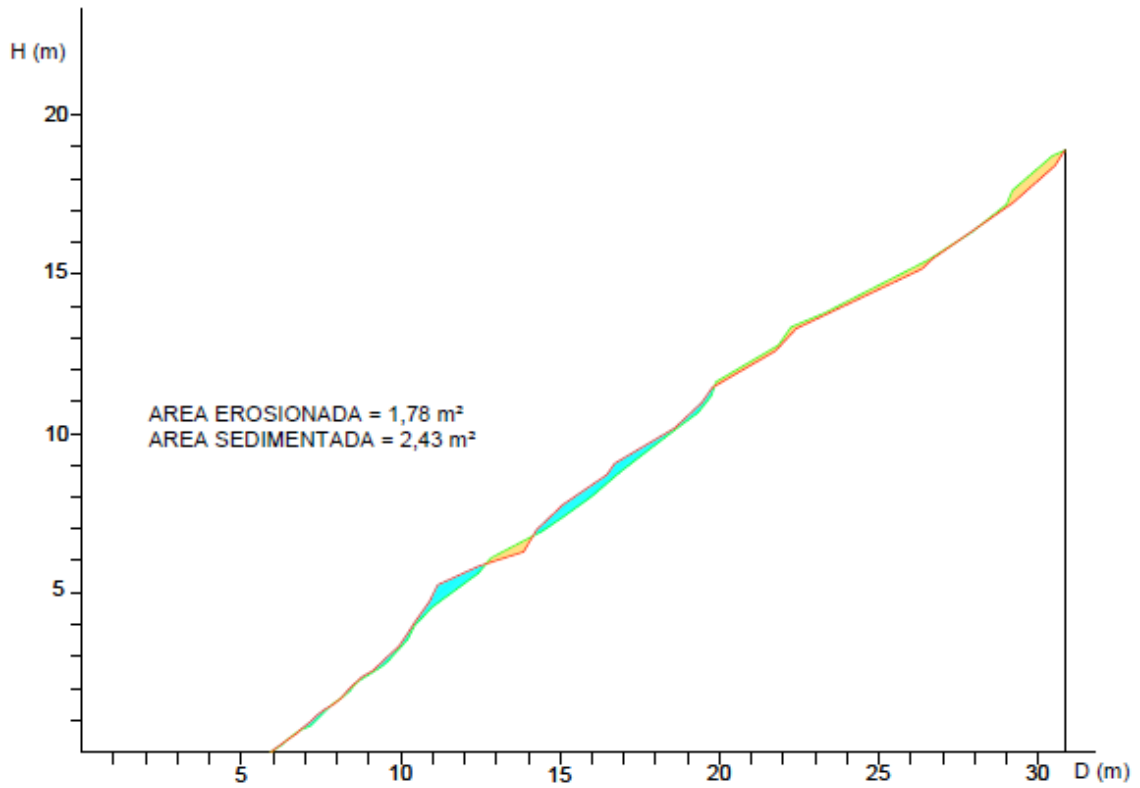
Figura 11.35. Comparación perfiles del periodo 2-3.

- Sección de control 3

Para esta sección no se puede mostrar la comparación de perfiles debido a que solo se pudo medir en Diciembre que es cuando presentaba suelo sin cubierta vegetal, en el resto de mediciones estaba cubierto de vegetación impidiendo la medición y por lo tanto la comparación de perfiles.

- Sección de control 4

- Periodo 1-2



LEYENDA

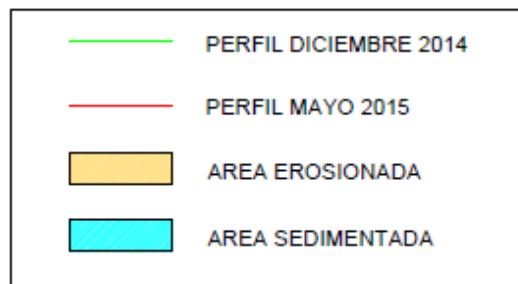
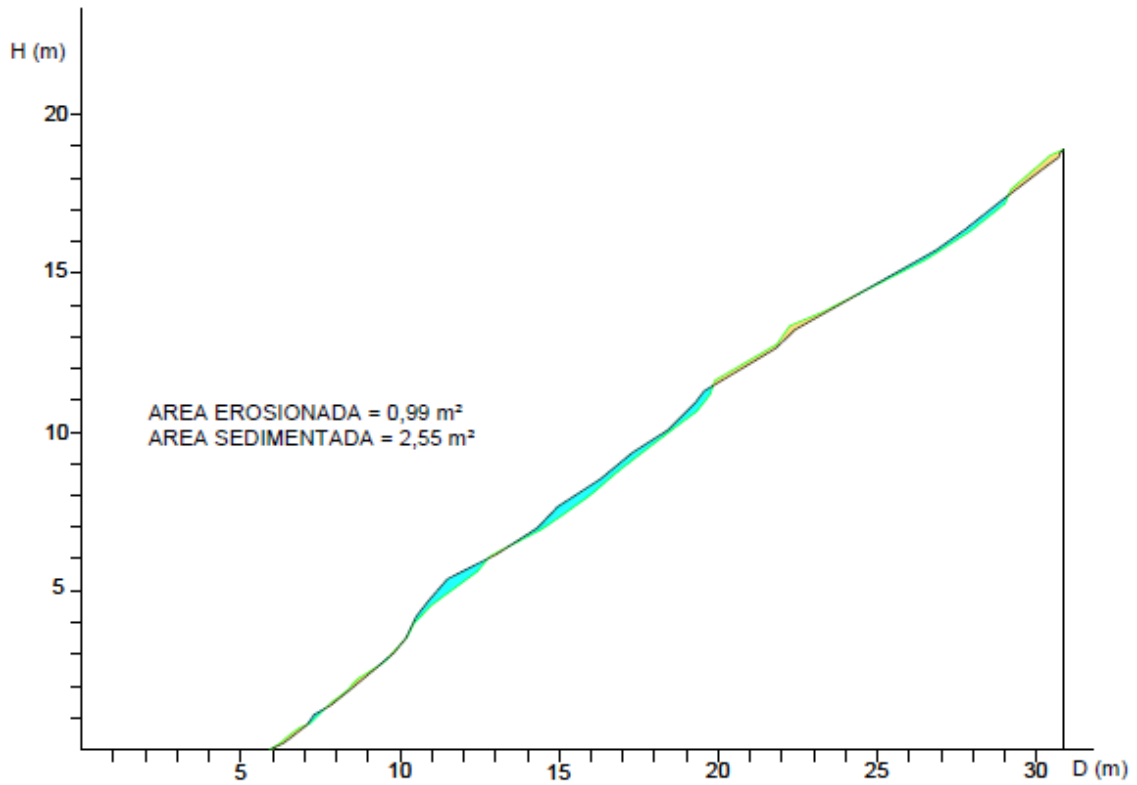


Figura 11.36. Comparación de perfiles obtenidos para el periodo 1-2.

- Periodo 1-3



LEYENDA

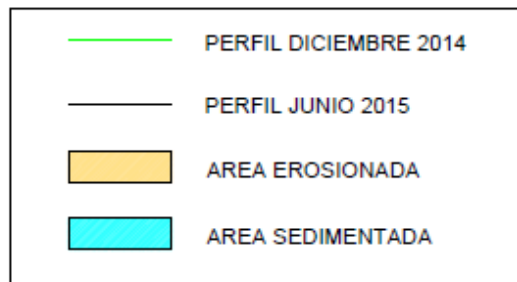


Figura 11.37. Comparación perfiles de Diciembre y Junio.

- Periodo 2-3

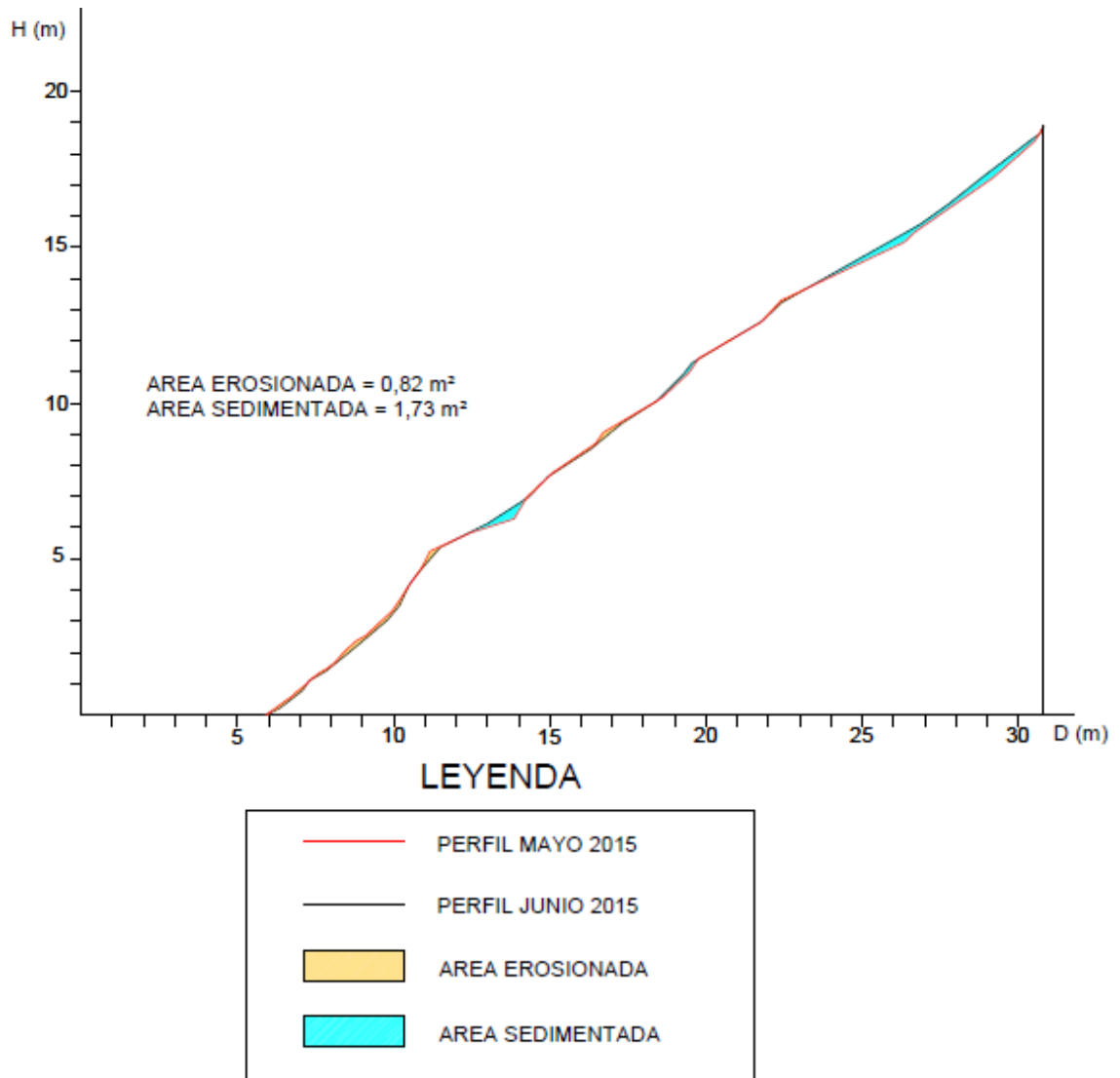


Figura 11.38. Comparación de perfiles entre las medidas de Mayo y Junio.

- Sección de control 5

De esta sección solo se dispone de la comparación del periodo 1-3, ya que en la medición del mes de Mayo la vegetación del fondo de la cárcava impidió la localización del clavo de referencia.

- Periodo 1-3

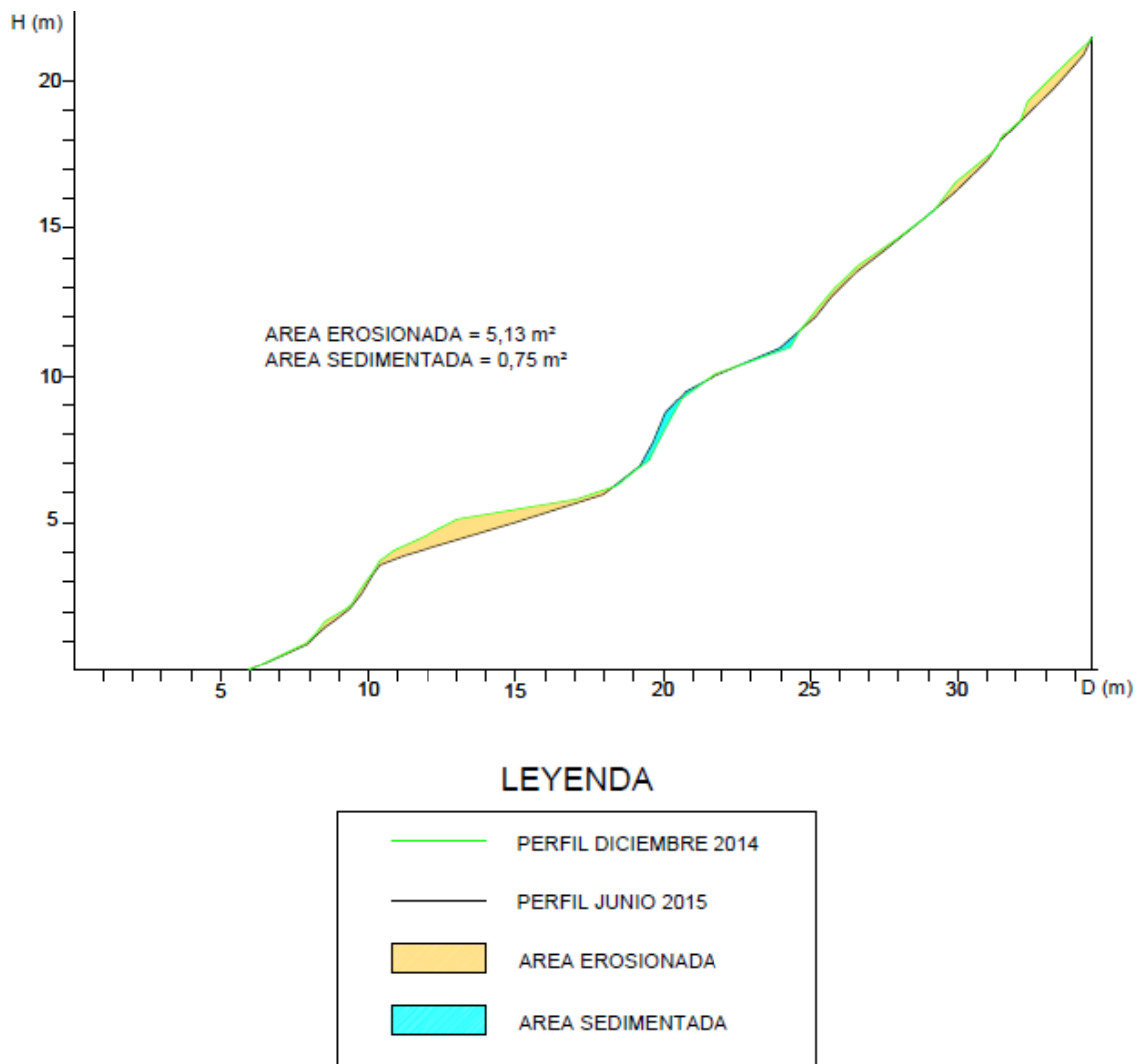


Figura 11.39. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

- Sección de control 6

- Periodo 1-2

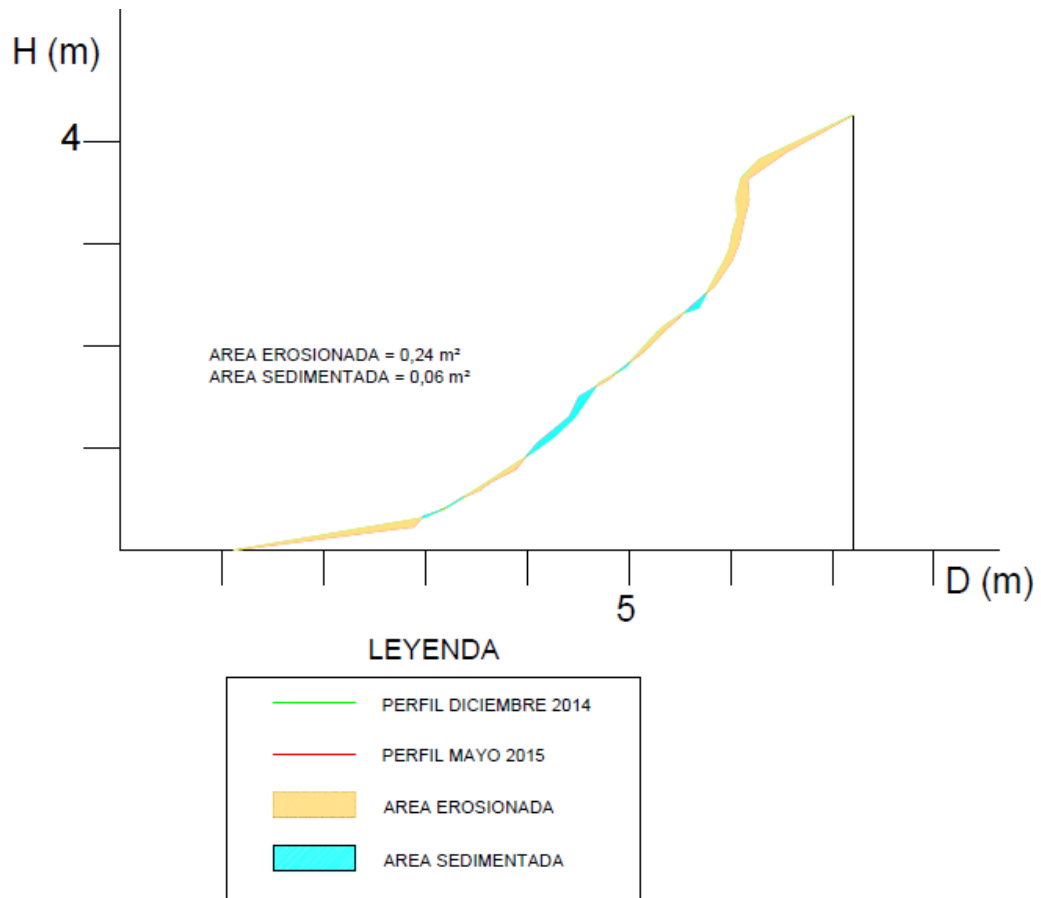


Figura 11.40. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Mayo.

- Periodo 1-3

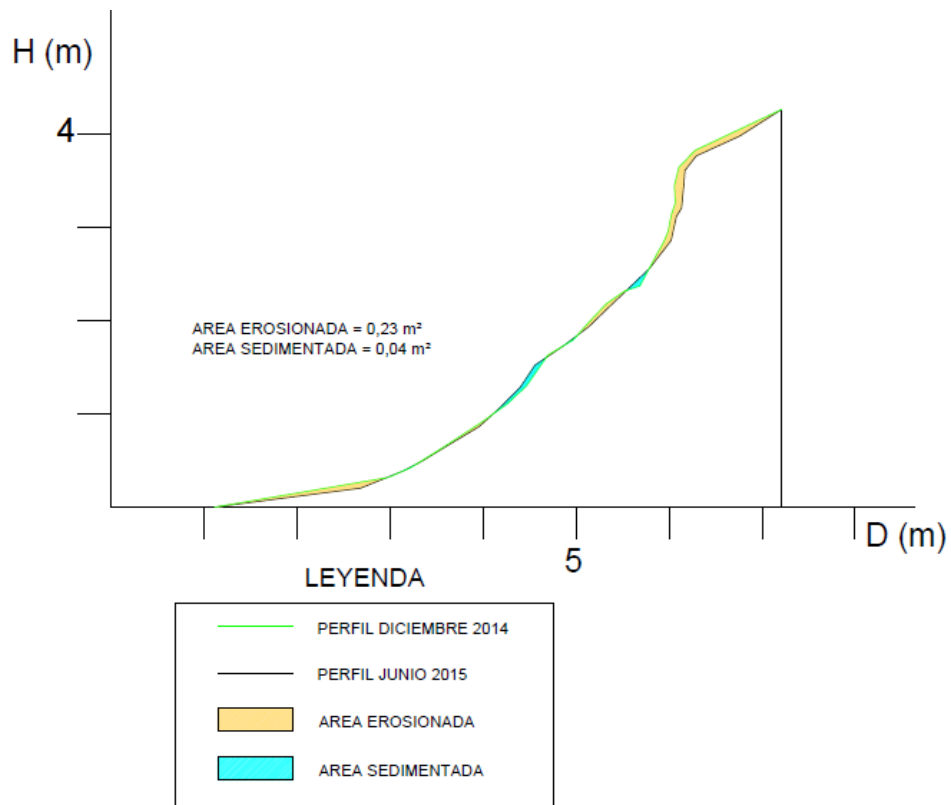


Figura 11.41. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio.

- Periodo 2-3

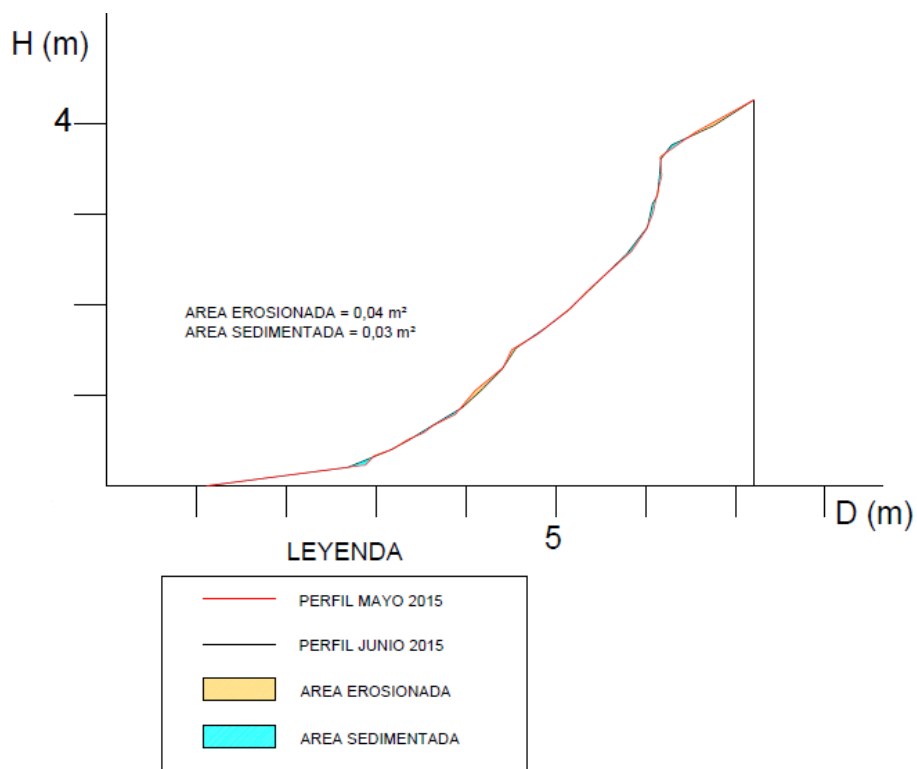


Figura 11.42. Comparación de los perfiles entre las medidas de Mayo y Junio.

- Sección de control 7

- Período 1-2

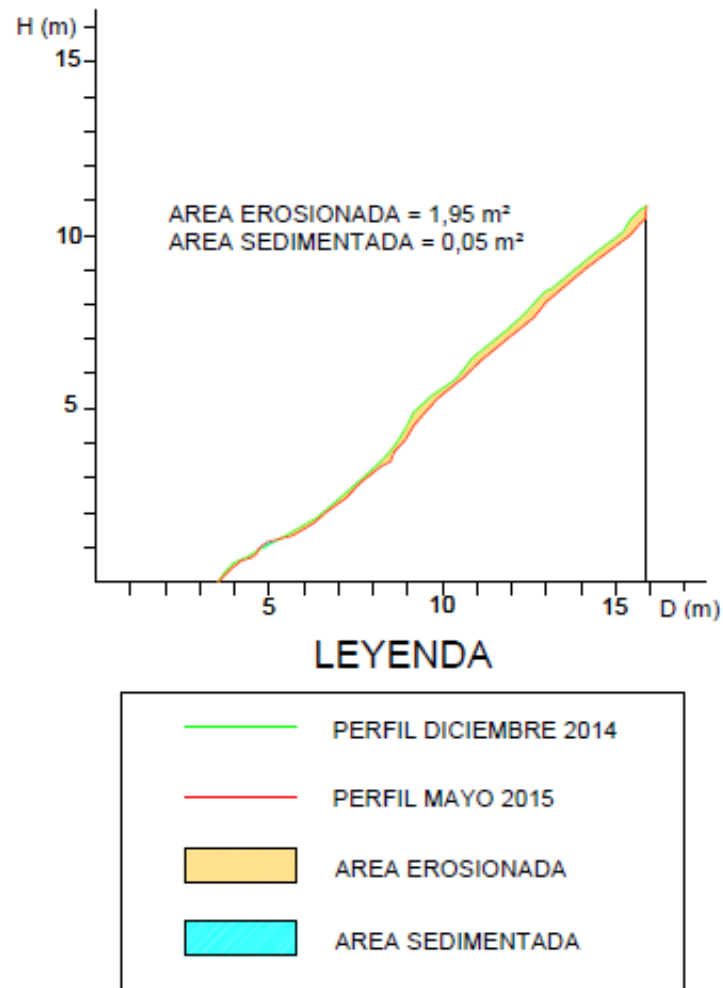


Figura 11.43. Comparación de los perfiles entre las medidas del período 1-2.

- Periodo 1-3

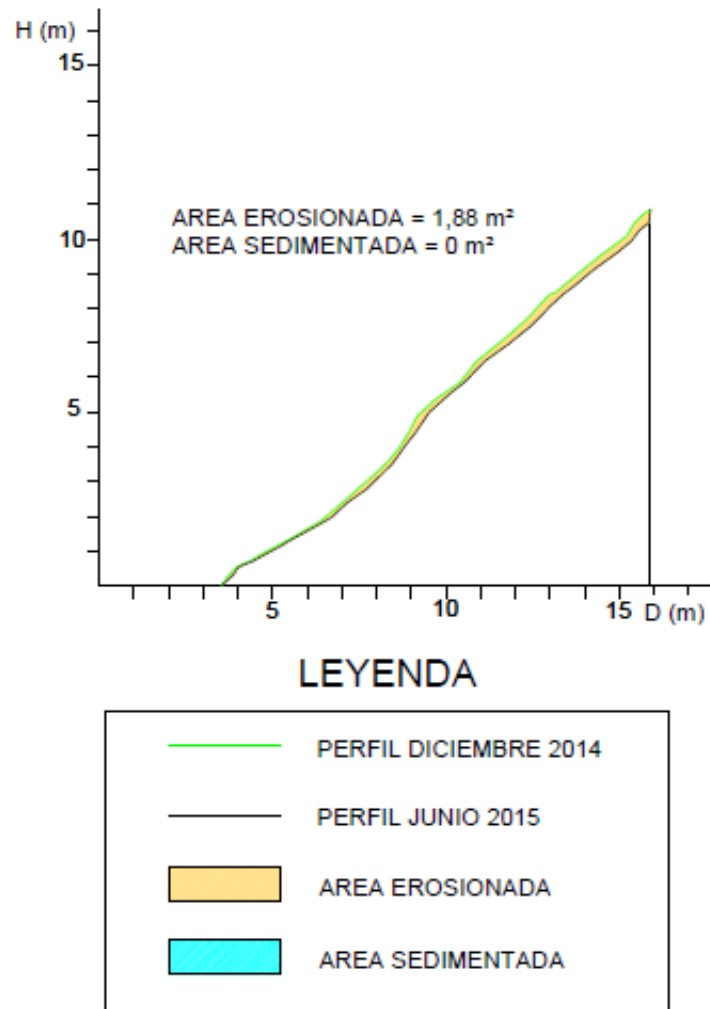


Figura 11.44. Comparación de los perfiles entre las medidas de Diciembre y Junio.

- Periodo 2-3

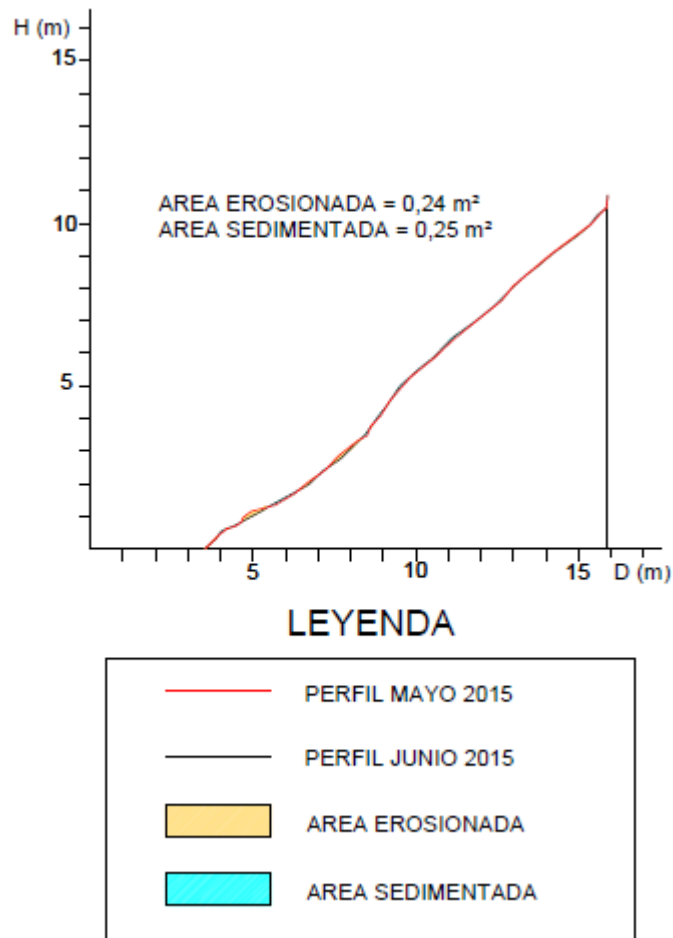


Figura 11.45. Comparación de los perfiles entre las medidas de Mayo y Junio y sus áreas de erosión y sedimentación.

- Sección de control 8

- Período 1-2

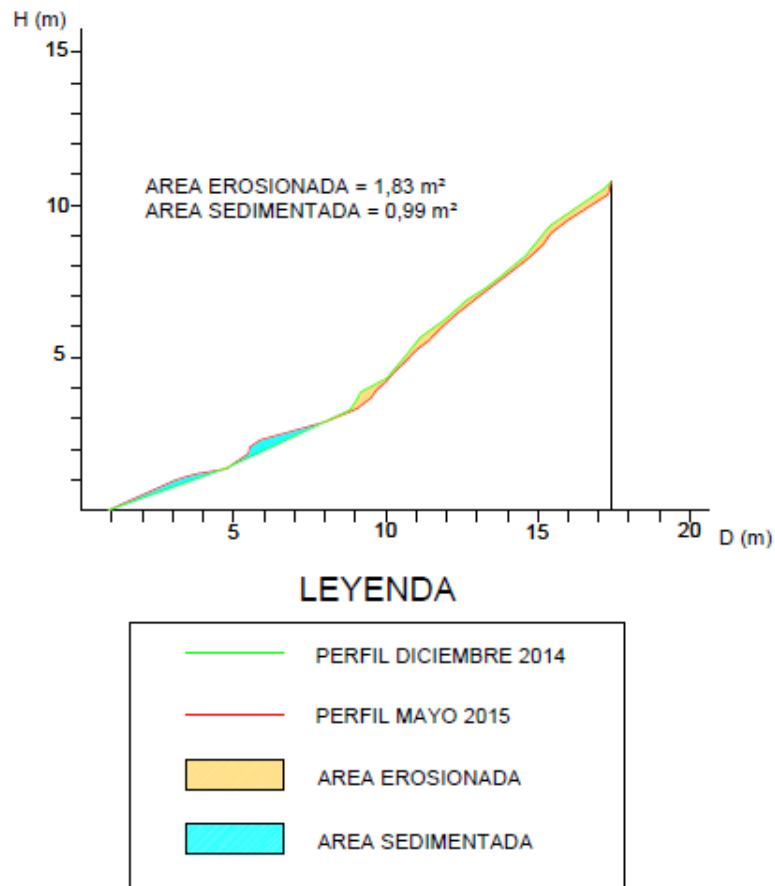


Figura 11.46. Comparación de los perfiles del periodo 1-2.

- Periodo 1-3

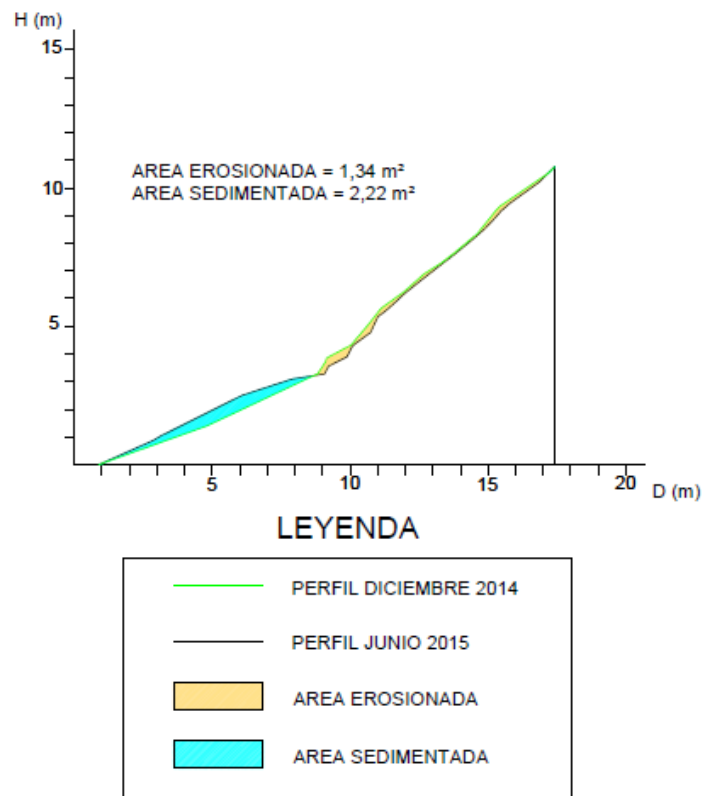


Figura 11.47. Comparación de los perfiles del periodo 1-3.

- Periodo 2-3

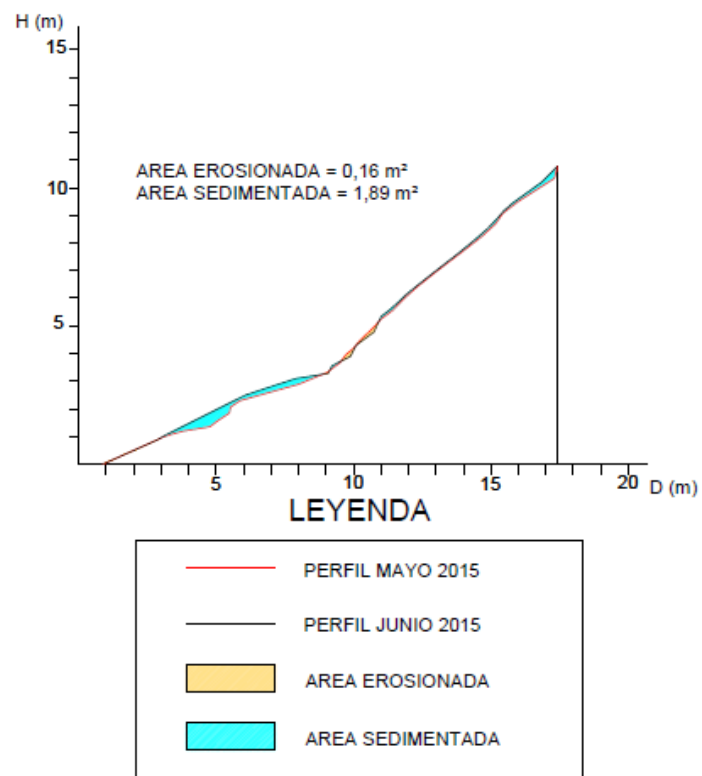


Figura 11.48. Comparación de los perfiles del periodo 2-3.

- Sección de control 9

- Período 1-2

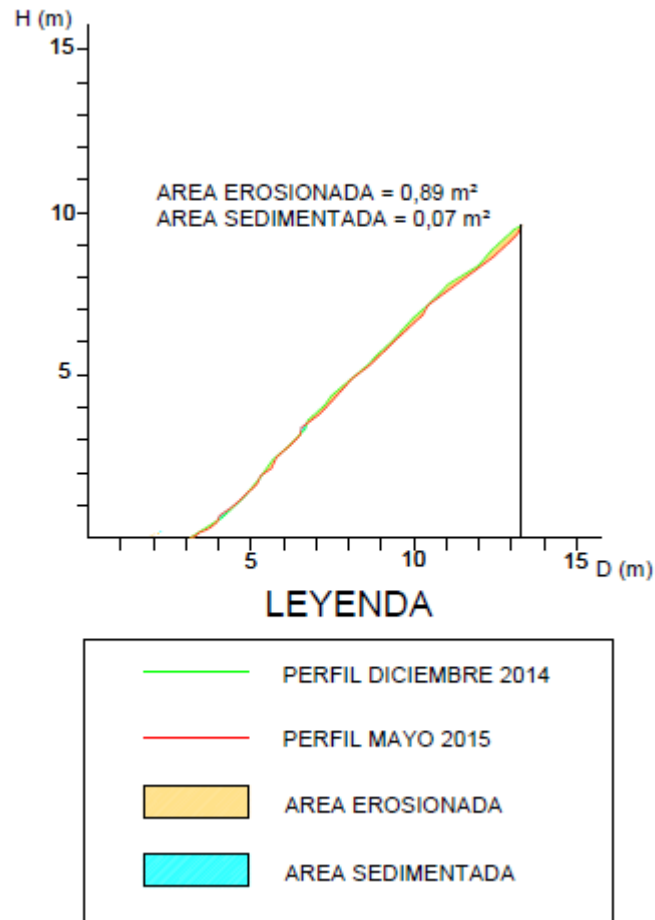


Figura 11.49. Comparación de perfiles para el período 1-2.

- Periodo 1-3

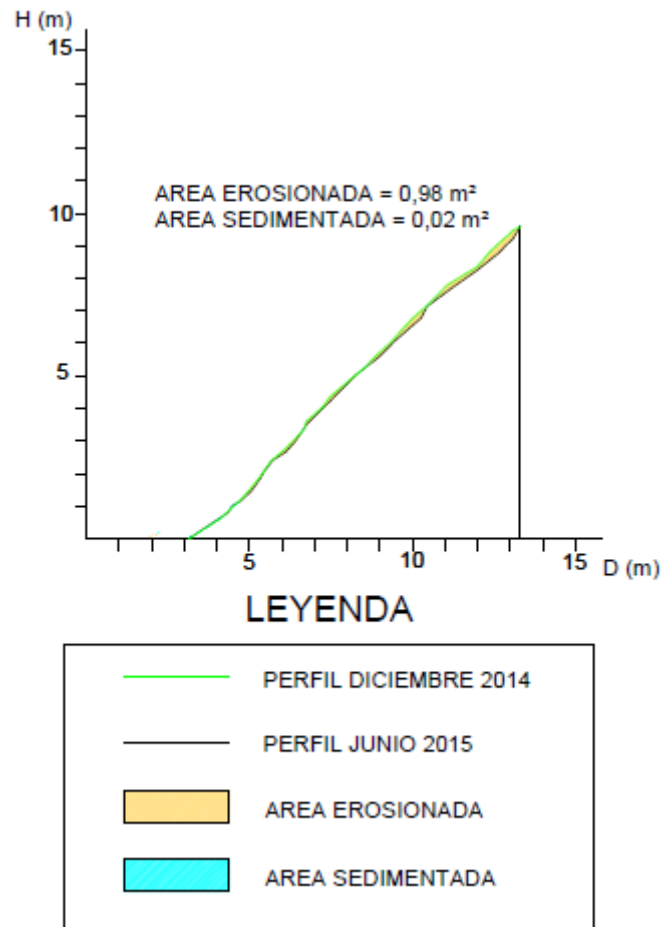


Figura 11.50. Comparación de perfiles para el periodo 1-3.

- Periodo 2-3

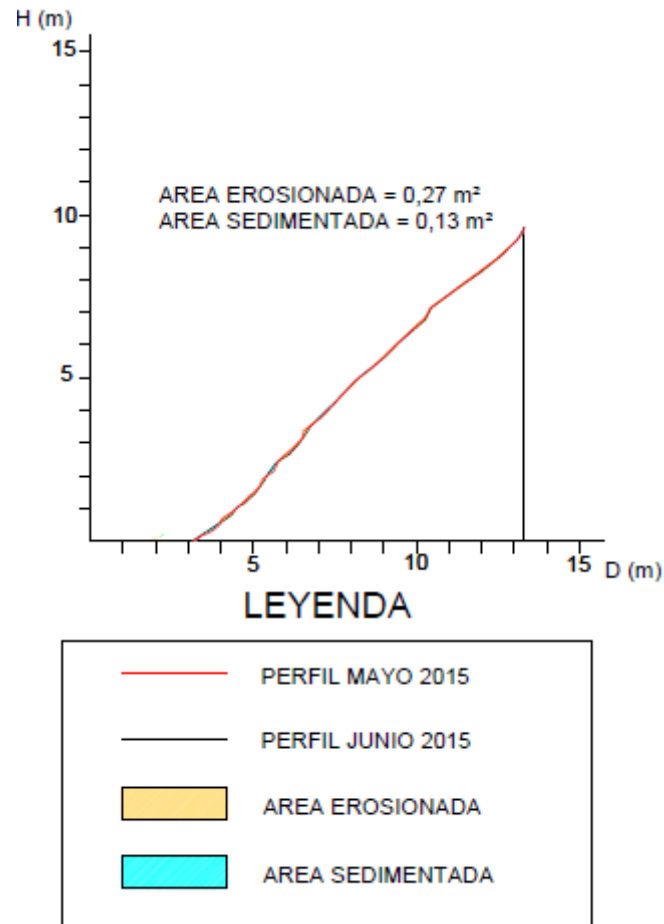


Figura 11.51. Comparación de perfiles para el periodo 2-3.

- Sección de control 10

- Período 1-2

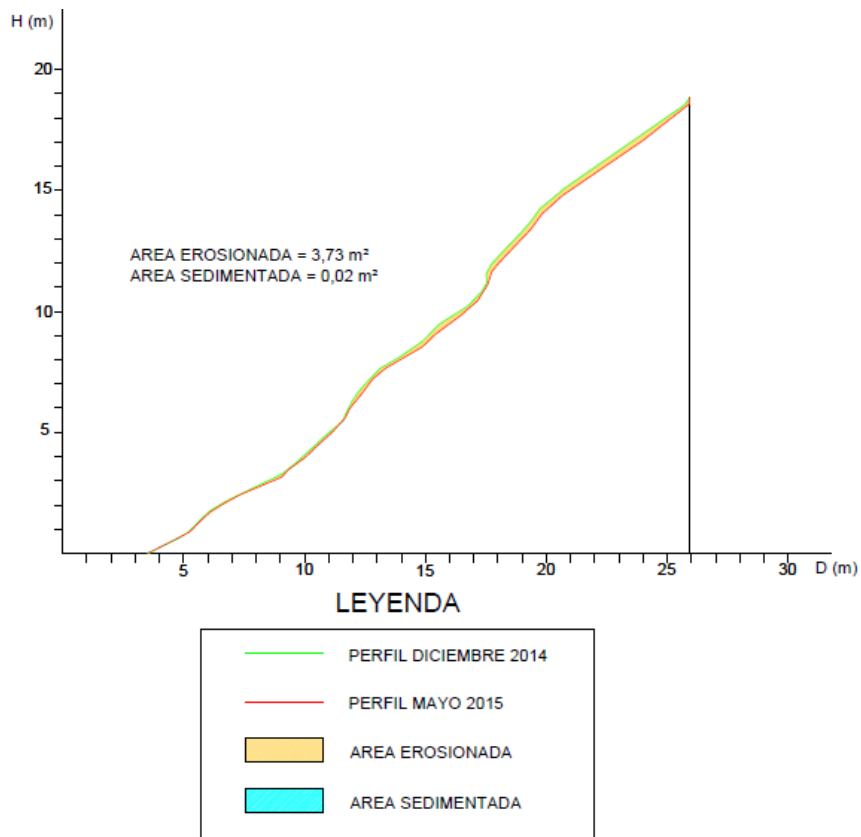


Figura 11.52. Comparación de perfiles para el período 1-2.

- Periodo 1-3

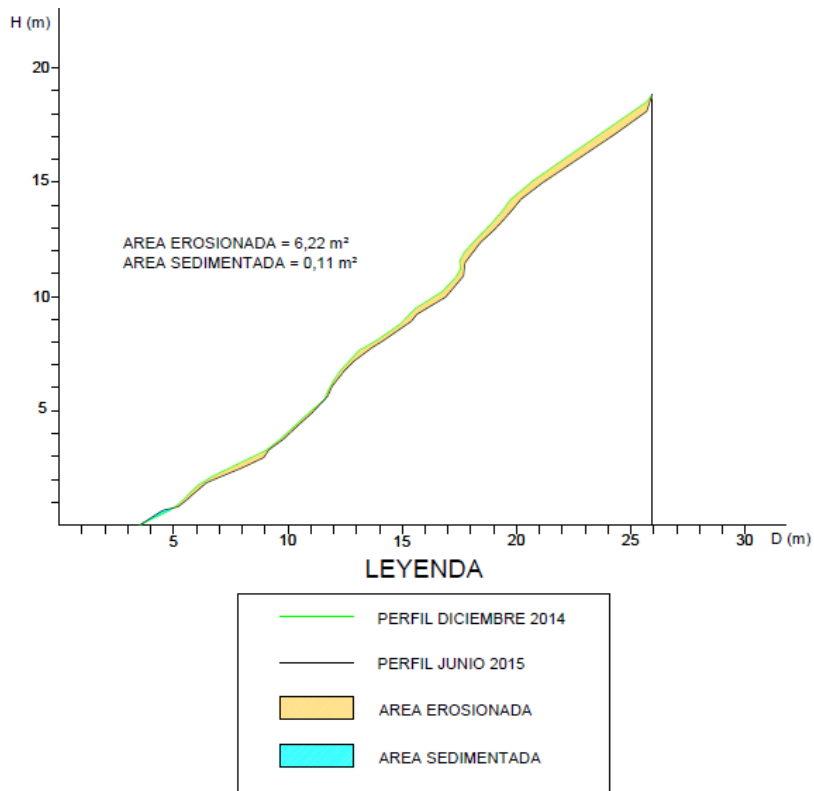


Figura 11.53. Comparación de perfiles para el periodo 1-3.

- Periodo 2-3

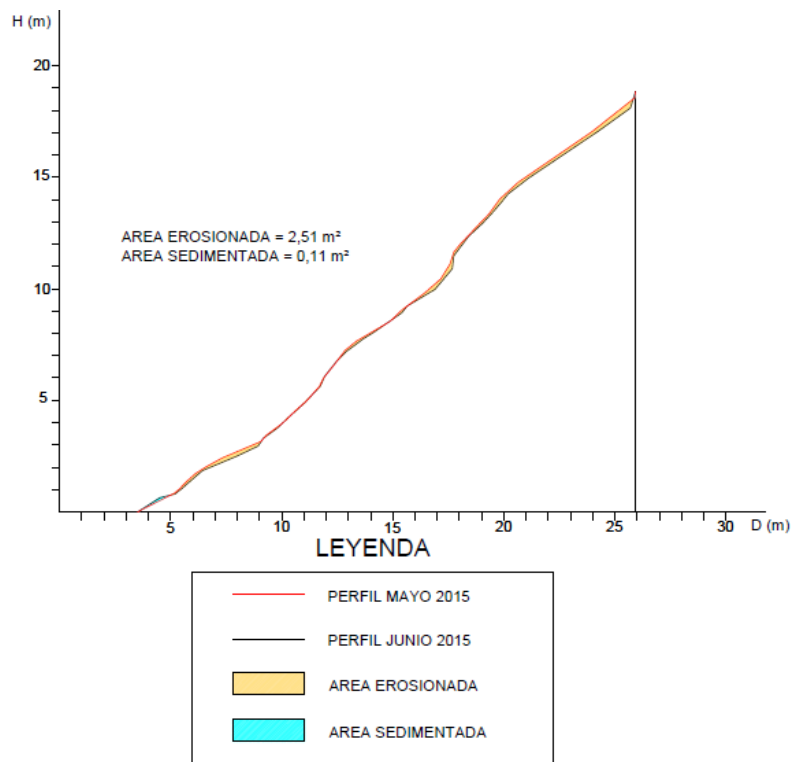


Figura 11.54. Comparación de perfiles para el periodo 2-3.

- Sección de control 11

- Período 1-2

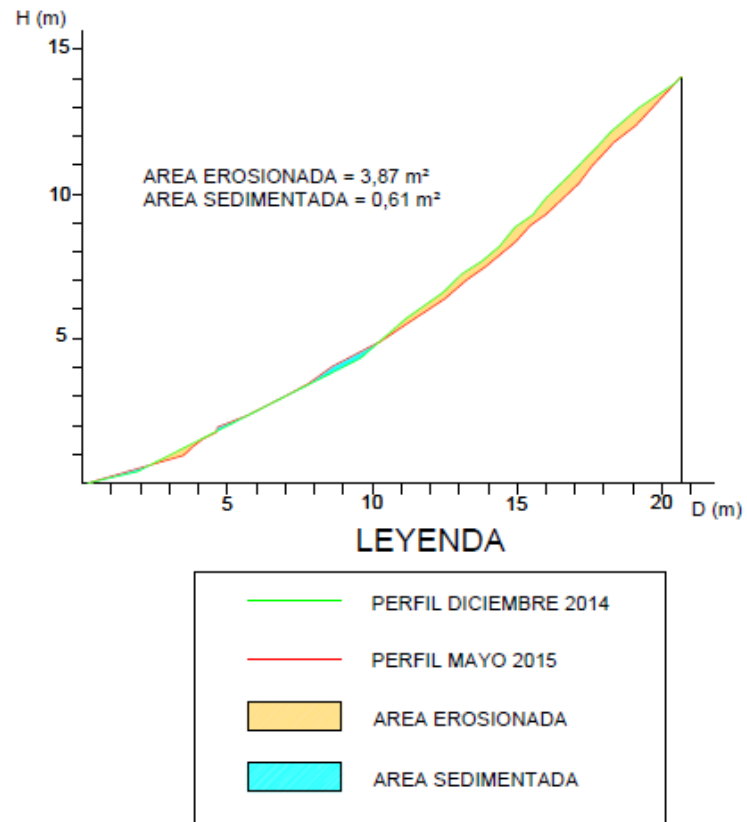


Figura 11.55. Comparación de perfiles para el período 1-2.

- Periodo 1-3

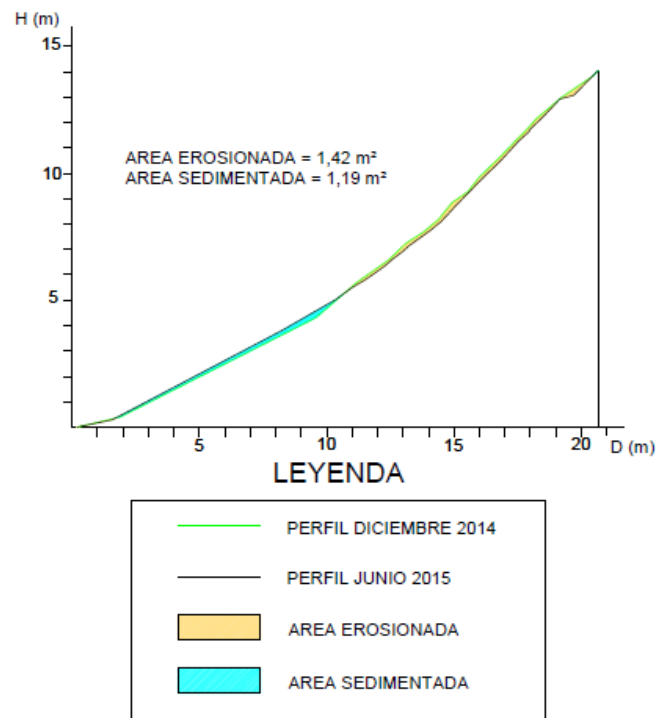


Figura 11.56. Comparación de perfiles para el periodo 1-3.

- Periodo 2-3

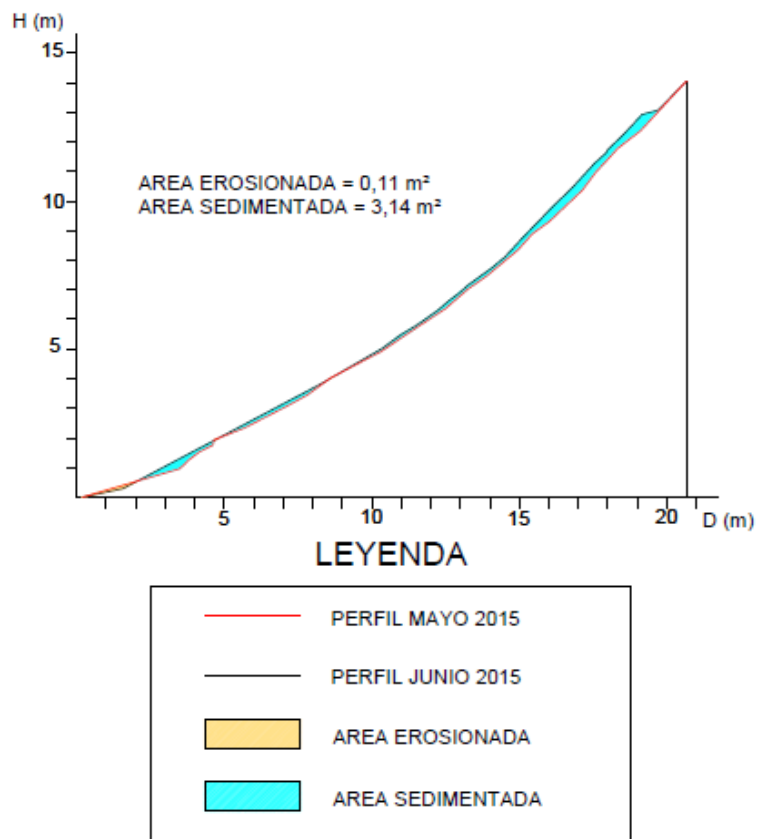


Figura 11.57. Comparación de perfiles para el periodo 2-3.

- Sección de control 12

- Período 1-2

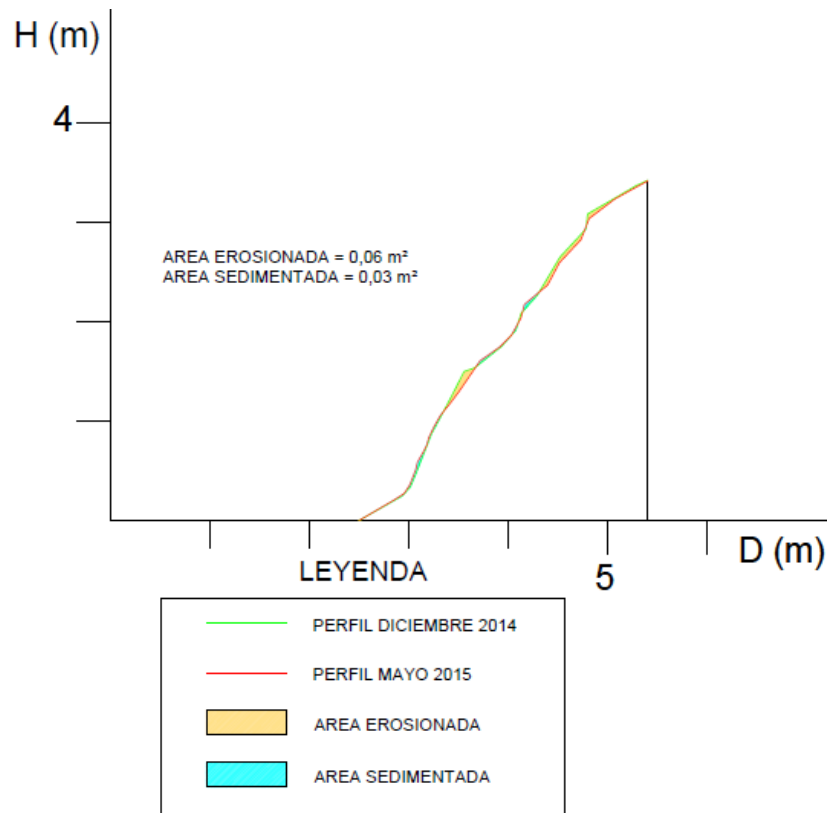


Figura 11.58. Comparación de perfiles para el período 1-2.

- Periodo 1-3

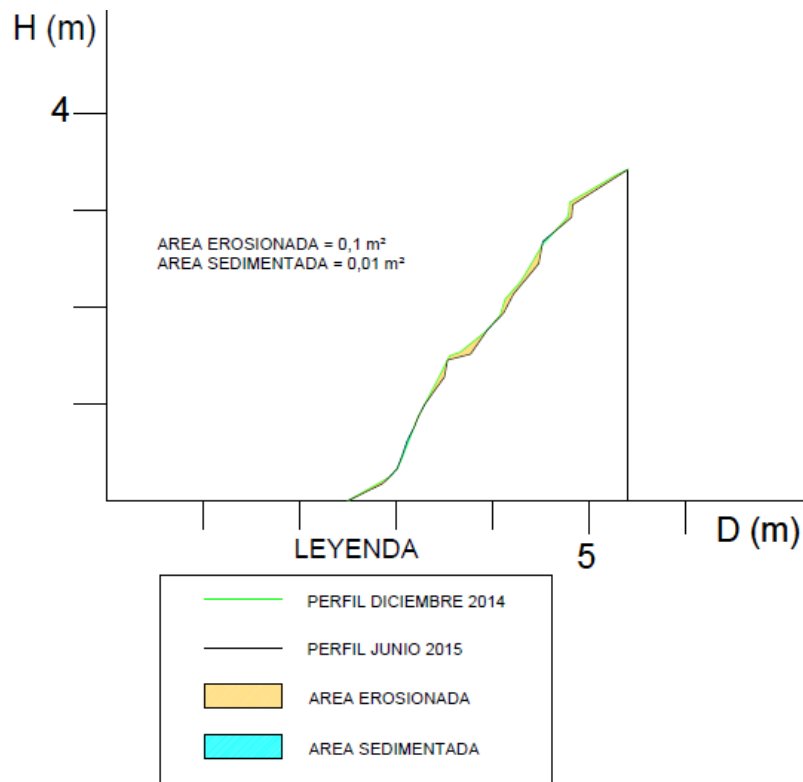


Figura 11.59. Comparación de perfiles para el periodo 1-3.

- Periodo 2-3

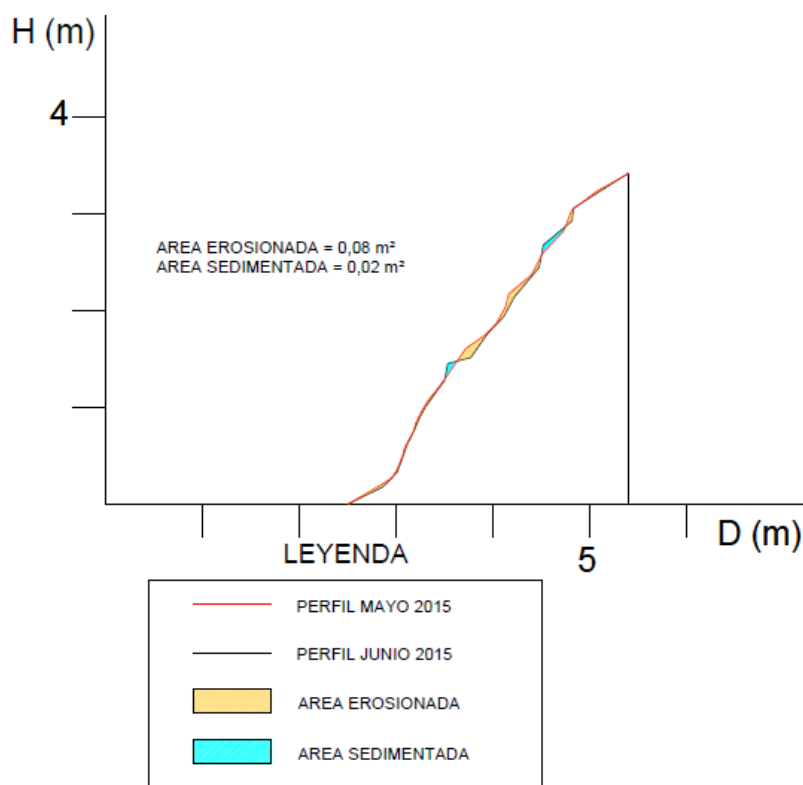


Figura 11.60. Comparación de perfiles para el periodo 2-3.

- Sección de control 13

- Período 1-2

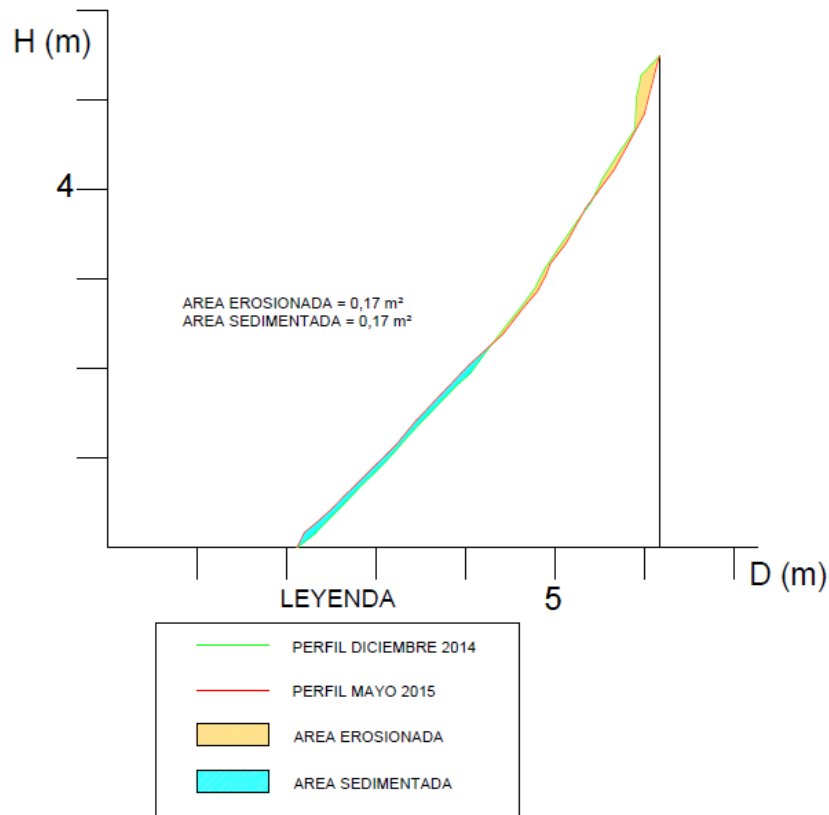


Figura 11.61. Comparación de perfiles del periodo 1.2.

- Periodo 1-3

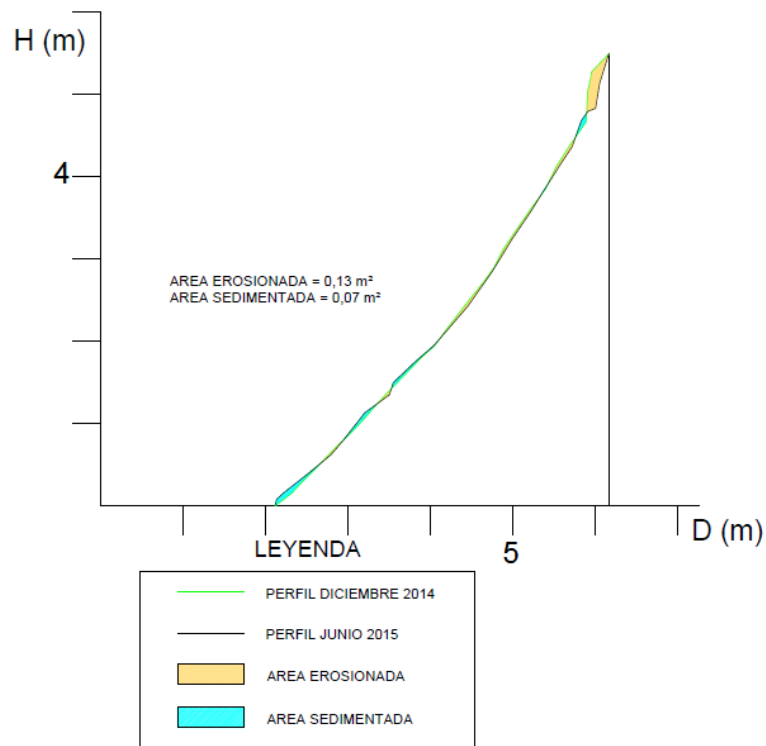


Figura 11.62. Comparación de perfiles para el periodo 1-3.

- Periodo 2-3

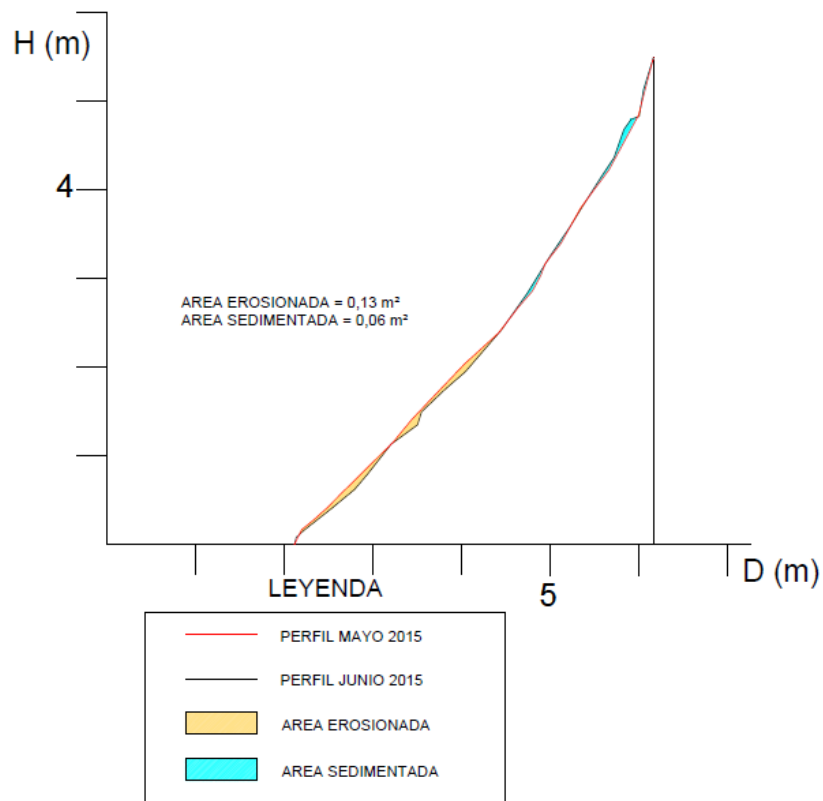


Figura 11.63. Comparación de perfiles para el periodo 2-3.

11.5.7. Cálculo de la erosión

Las áreas calculadas en el apartado anterior, se han utilizado para estimar las tasas erosivas. Con el área erosionada de cada sección, se calcula la cantidad de suelo perdido de la siguiente manera: multiplicando el área erosionada por la anchura de la sección (se ha decidido otorgar a cada sección una anchura de 0,2 m debido a que en campo consideramos que es la máxima anchura que representa cada perfil), de esta manera obtenemos los m³ de suelo perdido, que al multiplicar por la densidad aparente, calculada en el Anejo Edafológico, da los kg de suelo perdido. Pero no todo el suelo que se ha erosionado se va fuera del perfil de estudio, hay parte de ese suelo que se deposita en la parte baja y que se determina mediante lo que se ha llamado área sedimentada, que se multiplica por la misma anchura, pero la densidad aparente es diferente ya que se tomaron muestras del suelo sedimentado, lógicamente la densidad de este suelo es menor, ya que tiene más esponjamiento.

De tal manera que el suelo perdido o suelo que se ha ido fuera del perfil será la diferencia entre los kg de suelo perdido y los kg de suelo depositado. Si dividimos los kg perdidos entre el área de la sección (longitud x anchura) obtenemos kg/m², que ya podemos transformar en t/ha. Se ha calculado lo anteriormente descrito para todos los perfiles y para cada uno de los periodos.

- Periodo 1-2

Tabla 11.50. Características de los perfiles, tasas erosivas, promedio, máximos y mínimos para el periodo de estudio 1-2.

Perfil	Pdte. (%)	L. (m)	A.E. (m ²)	P.E. (kg)	A.S. (m ²)	P.S (kg)	S.Y. (kg/m ²)	S.Y. (t/ha)
2	60.18	19.22	2.75	905.19	0.05	15.74	231.33	2313.32
4	75.91	24.90	1.78	587.39	2.43	522.84	12.96	129.62
6	70.15	6.09	0.24	78.83	0.06	15.90	51.68	516.77
7	87.64	12.33	1.95	724.36	0.05	11.37	289.15	2891.45
8	65.18	16.56	1.83	681.44	0.99	211.88	141.77	1417.75
9	94.29	9.82	0.89	330.20	0.07	15.11	160.42	1604.23
10	84.05	22.39	3.73	1385.55	0.02	4.36	308.42	3084.24
11	68.66	20.46	3.87	1436.83	0.61	131.58	318.91	3189.07
12	117.80	2.91	0.06	18.81	0.03	7.47	19.51	195.05
13	135.70	4.05	0.17	54.48	0.17	48.68	7.17	71.67
Promedio	85.96	13.87	1.73	620.31	0.45	98.49	154.13	1541.32
MAX	135.70	24.90	3.87	1436.83	2.43	522.84	318.91	3189.07
MIN	60.18	2.91	0.06	18.81	0.02	4.36	7.17	71.67

Pdte: Pendiente sección; **L:** Longitud; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido.

- Periodo 1-3

Tabla 11.51. Características de los perfiles, tasas erosivas, promedio, máximos y mínimos para el periodo de estudio 1-3.

Perfil	Pdte. (%)	L. (m)	A.E. (m ²)	P.E. (kg)	A.S. (m ²)	P.S. (kg)	S.Y. (kg/m ²)	S.Y. (t/ha)
1	53.50	30.58	3.11	1023.81	1.98	588.32	71.20	712.04
2	60.18	19.22	2.87	944.09	0.32	95.23	220.77	2207.74
4	75.91	24.90	0.99	326.37	2.56	549.88	-44.88	-448.84
5	75.05	28.60	5.13	1689.66	0.75	160.80	267.33	2673.34
6	70.15	6.09	0.22	74.02	0.04	11.05	51.71	517.15
7	87.64	12.33	1.88	699.46	0.00	0.00	283.66	2836.61
8	65.18	16.56	1.34	498.72	2.22	476.81	6.62	66.18
9	94.29	9.82	0.98	363.42	0.02	4.17	182.91	1829.08
10	84.05	22.39	6.22	2311.84	0.11	23.63	510.97	5109.66
11	68.66	20.46	1.42	529.27	1.19	256.65	66.61	666.09
12	117.80	2.91	0.10	31.89	0.01	1.60	52.09	520.94
13	135.70	4.05	0.13	43.71	0.07	18.62	30.97	309.67
Promedio	82.34	16.49	2.03	711.35	0.77	182.23	141.66	1416.64
MAX	135.70	30.58	6.22	2311.84	2.56	588.32	510.97	5109.66
MIN	53.50	2.91	0.10	31.89	0.00	0.00	-44.88	-448.84

Pdte: Pendiente sección; **L:** Longitud; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo negativo indica que no ha habido pérdida de suelo, si no ganancia.

- Periodo 2-3

Tabla 11.52. Características de los perfiles, tasas erosivas, promedio, máximos y mínimos para el periodo de estudio 2-3.

Perfil	Pdte. (%)	L. (m)	A.E. (m ²)	P.E. (kg)	A.S. (m ²)	P.S. (kg)	S.Y. (kg/m ²)	S.Y. (t/ha)
2	60.18	19.22	0.80	263.85	0.95	281.88	-4.69	-46.89
4	75.91	24.90	0.82	268.96	1.73	372.94	-20.88	-208.81
6	70.15	6.09	0.04	13.67	0.04	10.99	2.20	21.99
7	87.64	12.33	0.24	87.51	0.25	53.71	13.71	137.09
8	65.18	16.56	0.16	60.01	1.89	405.38	-104.28	-1042.78
9	94.29	9.82	0.27	99.03	0.13	27.09	36.63	366.28
10	84.05	22.39	2.51	934.50	0.11	23.99	203.32	2033.20
11	68.66	20.46	0.11	42.29	3.14	674.50	-154.47	-1544.66
12	117.80	2.91	0.08	26.25	0.02	5.96	34.91	349.10
13	135.70	4.05	0.13	43.78	0.06	16.78	33.32	333.19
Promedio	85.96	13.87	0.52	183.98	0.83	187.32	3.98	39.77
Max	135.70	24.90	2.51	934.50	3.14	674.50	203.32	2033.20
Min	60.18	2.91	0.04	13.67	0.02	5.96	-154.47	-1544.66

Pdte: Pendiente sección; **L:** Longitud; **A.E:** Área Erosionada; **P.E:** Peso suelo erosionado; **A.S:** Área Sedimentada; **P.S:** Peso del suelo sedimentado; **S.Y:** Sediment Yield o Sedimento Emitido. Nota: El signo negativo indica que no ha habido pérdida de suelo, si no ganancia.