



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL

TESIS DOCTORAL:

**EL CONTROL DE LA SUPERVIVENCIA EN PLANTACIONES
AGROFORESTALES CON WATERBOXX MEDIANTE
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS E INFORMACIÓN
MULTIESPECTRAL**

Presentada por D. JOSÉ LUIS MARCOS ROBLES para optar al
grado de doctor por la **Universidad de Valladolid**

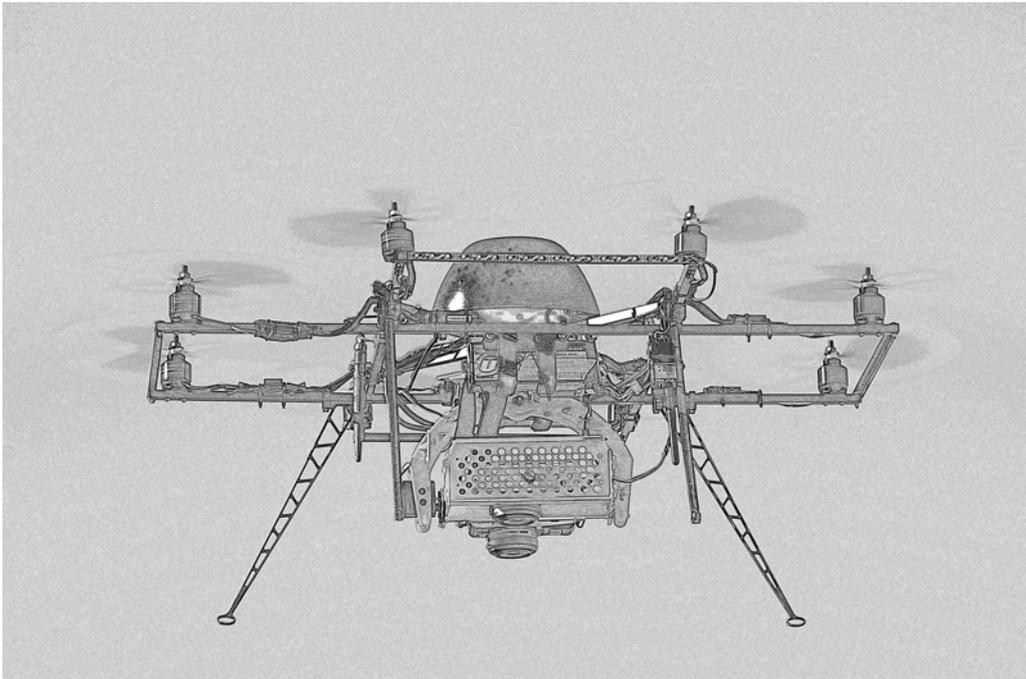
Dirigida por:
DRA. MARÍA DE LA LUZ GIL DOCAMPO
DR. SALVADOR HERNÁNDEZ NAVARRO
DR. JUAN ORTIZ SANZ



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL



**EL CONTROL DE LA SUPERVIVENCIA EN PLANTACIONES
AGROFORESTALES CON WATERBOXX MEDIANTE
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS E INFORMACIÓN
MULTIESPECTRAL**

TESIS DOCTORAL

JOSÉ LUIS MARCOS ROBLES
Septiembre 2015

A mi familia, a mis amigos y en especial a mi esposa Paloma

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi agradecimiento a todas las personas que han colaborado y apoyado la realización de esta Tesis Doctoral.

A mi directora Dra. Mariluz Gil por sus sabios consejos, su guía y sobre todo su luz.

A mis directores Dr. Salvador Hernández y Dr. Juan Ortiz por su ayuda, su apoyo y sus ánimos en los momentos más duros.

A todos los miembros participantes en el Proyecto Europeo LIFE+: “los Desiertos Verdes”, pertenecientes a ayuntamientos, diputaciones y empresas. Gracias a Pieter Hoff, inventor del Waterboxx y gracias, en especial, a mis amigos y compañeros de la Universidad de Valladolid Zacarías, Fermín, Salvador, Luis, Ángeles, Margarita, Andrés, Feli y Evelio.

A Santi y a Luis Fer, compañeros de andanzas, cursos, aventuras y desventuras y expertos pilotos de drones y al resto de miembros de las Universidades de Valladolid y Santiago de Compostela que han colaborado en este proyecto.

A mis compañeros del área y del centro que me han expresado su apoyo en estos últimos años tan complicados, en especial al equipo directivo de la ETS de Ingenierías Agrarias.

Al Proyecto Europeo del Programa LIFE+: “Los Desiertos Verdes”.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de investigación bajo el título “El control de la supervivencia en plantaciones agroforestales con Waterboxx mediante Vehículos Aéreos No Tripulados e información multiespectral”, se ha realizado en el marco del programa de doctorado del Master de Investigación para el Desarrollo Agroforestal perteneciente al Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal de la Universidad de Valladolid.

Se inscribe en la línea de investigación de las nuevas tecnologías aplicadas al ámbito agroforestal.

Su elaboración ha sido llevada a cabo bajo la dirección de la Dra. Dña. María de la Luz Gil Docampo de la Universidad de Santiago de Compostela, del Dr. D. Salvador Hernández Navarro de la Universidad de Valladolid y del Dr. D. Juan Ortiz Sanz de la Universidad de Santiago de Compostela.

El control de la supervivencia en plantaciones agroforestales con Waterboxx mediante Vehículos Aéreos No Tripulados e información multiespectral

RESUMEN

El avance de la tecnología está contribuyendo al surgimiento de técnicas de monitorización que facilitan una toma de datos de manera rápida, precisa y fiable. Los Vehículos Aéreos No Tripulados suponen una alternativa novedosa e interesante para elevar cámaras multiespectrales y realizar estudios de la vegetación y biomasa.

Uno de los factores que más inciden en la supervivencia de las plantaciones agroforestales en climas áridos es el estrés hídrico. En los primeros estadios de crecimiento, cuando los plantones necesitan más humedad, el Waterboxx (©Groasis), un recipiente capaz de recoger y almacenar el agua de del rocío y de la lluvia, puede aportar la cantidad mínima de agua necesaria para que éstos sobrevivan. El Proyecto del Programa Europeo LIFE+: “Los Desiertos Verdes”, pretende comprobar si el uso de esta tecnología puede contribuir a aumentar la supervivencia de las plantas en climas extremos y suelos degradados.

El control de la supervivencia se ha venido realizando mediante muestreos sistemáticos a pie de campo. En esta Tesis Doctoral nos planteamos como objetivo principal establecer una metodología que permita discriminar las plantas vivas de las muertas en Waterboxx mediante sensores aeroportados con aeronaves no tripuladas en parcelas de grandes dimensiones.

Durante un período de 5 años se han realizado 15 vuelos con estas plataformas de vuelo. En esos vuelos se han testado tres métodos diferentes estableciéndose relaciones entre tipo de cámara, resolución del sensor, altura de vuelo y tamaño y vigor de la planta. A través de cada uno de los vuelos, se han obtenido datos que se han procesado obteniendo ortofotos y ortomosaicos. Tras su tratamiento digital se ha realizado el análisis visual obteniéndose unos índices de Exactitud Global muy elevados con un porcentaje mínimo de plantas dudosas.

Palabras clave: teledetección, estrés hídrico, RPA, ortomosaico, MDT, ACP.

Survival control in agroforestry with Waterboxx by multispectral Unmanned Aerial Vehicles and multispectral information

ABSTRACT

The advancement of technology is contributing to the emergence of monitoring techniques that facilitate data collection in a fast, accurate and reliable way. Unmanned Aerial Vehicles represent a novel and interesting alternative to raise multispectral cameras and studies of vegetation and biomass.

One of the factors that most affect the survival of agroforestry in arid climates is water stress. In the early stages of growth, when the plants need more moisture, Waterboxx (© Groasis), a container able to collect and store water from dew and rain, can provide the minimum amount of water needed for them to survive. The European Project LIFE + Programme: "The Green Deserts" aims to verify whether the use of this technology can help to increase plant survival in extreme climates and degraded soils.

Survival control has been carried out through systematic walk field sampling. In this thesis we consider as main objective to establish a methodology that allows distinguishing live from dead plants in Waterboxx by using airborne sensors with unmanned aircrafts have been carried out.

Over a period of 5 years, 15 flights were carried out. Each flight was tested by a method, using a total of three different methods in our study. The tested method allowed establishing relationships between type of camera, sensor resolution, flying height and size and vigor of the plant. Through each of the flights, data was obtained that were processed to obtain orthophotos and orthomosaics. After digital processing, a visual analysis was conducted, obtaining very high Global Accuracy rates with a minimum percentage of doubtful plants.

Keywords: remote sensing, water stress, UAV, orthomosaic, DEM, PCA.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PARTE I ANTECEDENTES	9
<u>CAPÍTULO 1. LA SUPERVIVENCIA DE LAS PLANTAS EN ZONAS ÁRIDAS</u>	13
1.1. PLANTACIONES AGROFORESTALES EN ZONAS ÁRIDAS	13
1.2. EL PROYECTO LIFE+ “LOS DESIERTOS VERDES”	16
1.2.1. El Waterboxx: tecnología y tipos	17
1.2.2. Resultados del proyecto	20
1.3. TÉCNICAS DE MUESTREO EN ESPECIES VEGETALES	21
<u>CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN MEDIANTE PLATAFORMAS DE ELEVACIÓN Y SENSORES AEROPORTADOS</u>	25
2.1. PLATAFORMAS DE ELEVACIÓN DE SENSORES Y CÁMARAS	25
2.2. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS	27
2.2.1. Definición	27
2.2.2. Origen y desarrollo	28
2.2.3. Clasificación	29
2.2.4. Modos de operación	31
2.3. CÁMARAS MULTIESPECTRALES	32
2.4. TRATAMIENTOS DIGITALES	33
2.5. EL USO COMBINADO DE LOS RPAS Y SENSORES Y SUS APLICACIONES	36
2.5.1. Aplicaciones en el ámbito de la ingeniería	36
2.5.2. Aplicaciones en el estudio de la vegetación y de la biomasa	38
2.5.3. Aplicaciones en la determinación individual del estado de salud de una planta	40
<u>CAPÍTULO 3. OBJETIVOS</u>	45
3.1. OBJETIVO PRINCIPAL	45

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	45
PARTE II MATERIAL Y MÉTODOS	47
<u>CAPÍTULO 4. MATERIAL</u>	51
4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO Y DE LAS ESPECIES	51
4.1.1. Localización de las parcelas	51
4.1.2. Especies analizadas	53
4.2. PLATAFORMAS DE VUELO	54
4.2.1. Plataformas de vuelo de Ala Rotatoria (multirrotores)	55
4.2.2. Microdrone MD4-1000	55
4.2.2.1. Mikrokopter OKTO XL	56
4.2.2.2. Mikrokopter UFOCAMXXL8 V3	57
4.2.3. Plataformas de vuelo de ala fija	59
4.2.3.1. Skywalker	59
4.3. CÁMARAS RGB Y MODIFICADAS	61
4.3.1. Cámara réflex Canon EOS 400D digital	61
4.3.2. Cámara convencional Olympus PEN E-P1 y modificada	62
4.3.3. Cámara RGB compacta Canon A-810	63
4.4. CÁMARAS MULTIESPECTRALES	63
4.4.1. Cámara multiespectral de 6 canales Tetracam Mini MCA-6	64
4.4.2. Cámara multiespectral de un sensor Tetracam ADC Micro	65
4.5. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	66
4.6. SOFTWARE	67
4.6.1. Software utilizado para planificar y pilotar las aeronaves	67
4.6.2. Software utilizado por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	68
4.6.3. Software utilizado en procesado de la cámara multiespectral Tetracam Mini MCA-6	68
4.6.4. Software utilizado en procesado de cámaras convencionales	69
4.6.5. Software utilizado en procesado de la cámara multiespectral Tetracam ADC Micro	70

<u>CAPÍTULO 5. MÉTODOS</u>	73
5.1. CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES (TETRACAM MINI MCA-6 DIGITAL) + MULTIRROTOR	75
5.1.1. Toma de datos de campo	76
5.1.1.1. Experimento previo al primer vuelo. Año 2011	77
5.1.1.2. Primer vuelo: Villarramiel (Palencia). Año 2011	79
5.1.1.3. Segundo vuelo: San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2012	80
5.1.1.4. Tercer vuelo: Soto de Cerrato (Palencia). Año 2013.	82
5.1.2. Pre-procesado de las imágenes	84
5.1.3. Creación de mosaicos y georreferenciación	85
5.1.3.1. Georreferenciación de cada imagen y fusión para obtención del mosaico	85
5.1.3.2. Ensamblado automático y georreferenciación posterior del mosaico obtenido	87
5.1.4. Tratamientos digitales	88
5.1.4.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	88
5.1.4.2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	89
5.1.4.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (Green NDVI)	89
5.1.4.4. Realce de contraste	90
5.1.4.5. Análisis de Componentes Principales (ACP)	90
5.1.4.6. Filtros	91
5.1.5. Análisis de las imágenes tratadas	92
5.2. CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA (OLYMPUS PEN E-P1) + MULTIRROTOR	93
5.2.1. Toma de datos de campo	96
5.2.1.1. Cuarto y quinto vuelos: Soto de Cerrato (Palencia). Años 2013 y 2014	96
5.2.1.2. Sexto vuelo: Sarracín de Aliste (Zamora). Año 2013	97
5.2.1.3. Séptimo y octavo vuelos: Fuensaldaña (Valladolid). Años 2013 y 2014	98
5.2.1.4. Noveno vuelo: Finca de Matallana 1, Villalba de los Alcores (Valladolid). Año 2014	100
5.2.1.5. Décimo vuelo: San Isidro (Puebla de Lillo, Leon). Año 2015	101
5.2.1.6. Undécimo vuelo: Riofrío de Aliste (Zamora). Año 2015	102
5.2.1.7. Duodécimo vuelo: Pedrajas de San Esteban (Valladolid). Año 2015	104
5.2.2. Creación de ortofotos georreferenciadas	105
5.2.3. Tratamientos digitales	106

5.2.4. Análisis de las imágenes tratadas	106
5.3. CÁMARA COMPACTA RGB Y CÁMARA MULTIESPECTRAL DE UN SENSOR (ADC MICRO) + ALA FIJA (SKYWALKER KIT)	107
5.3.1. Toma de datos de campo	109
5.3.1.1. Décimo tercero vuelo: San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2015	109
5.3.1.2. Décimo cuarto y décimo quinto vuelos: Finca de Matallana 2 en Villalba de los Alcores y La Mudarra (Valladolid). Año 2015	111
5.3.2. Pre-procesado y generación de ortomosaicos	112
5.3.3. Tratamientos digitales	112
5.3.4. Análisis de las imágenes tratadas	112
5.4. RESUMEN FINAL DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA	113
PARTE III. RESULTADOS	115
<u>CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	119
6.1. RESULTADOS CON CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES (TETRACAM MINI MCA-6 DIGITAL) + MULTIRROTOR	119
6.1.1. Resultados del primer vuelo en Villarramiel (Palencia). Año 2011	119
6.1.1.1. Identificación de plantones vivos en <i>Castanea Sativa</i> y <i>Betula Pendula</i>	121
6.1.1.2. Identificación de plantones vivos en <i>Pinus pinaster</i> y <i>Quercus ilex</i>	123
6.1.1.3. Identificación de marras en cualquiera de las especies	126
6.1.1.4. Cálculo de la exactitud en la detección de marras mediante teledetección	127
6.1.2. Resultados del segundo vuelo en San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2012	129
6.1.2.1. Identificación de plantones vivos en <i>Robinia pseudoacacia</i>	132
6.1.2.2. Identificación de marras en <i>Robinia pseudoacacia</i>	133
6.1.2.3. Cálculo de la exactitud en la detección de marras mediante teledetección	134
6.1.3. Resultados del tercer vuelo en Soto de Cerrato (Palencia). Año 2013	136
6.2. RESULTADOS CON CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA (OLYMPUS PEN E-P1) + MULTIRROTOR	138
6.2.1. Resultados del cuarto vuelo en Soto de Cerrato (Palencia). Año 2013	138
6.2.2. Resultados del quinto vuelo en Soto de Cerrato (Palencia). Año 2014	143
6.2.3. Resultados del sexto vuelo en Sarracín de Aliste (Zamora). Año 2013	149

6.2.4. Resultados del séptimo vuelo en Fuensaldaña (Valladolid). Año 2013	155
6.2.5. Resultados del octavo vuelo en Fuensaldaña (Valladolid). Año 2014	158
6.2.6. Resultados del noveno vuelo en la Finca de Matallana 1 (Valladolid). 2014	162
6.2.7. Resultados del décimo vuelo en San Isidro (León). Año 2015	166
6.2.8. Resultados del undécimo vuelo en Riofrío de Aliste (Zamora). Año 2015	172
6.2.9. Resultados del duodécimo vuelo en Pedrajas de San Esteban (Valladolid). Año 2015	178
6.3. RESULTADOS CON CÁMARA COMPACTA RGB Y CÁMARA MULTIESPECTRAL DE UN SENSOR (ADC MICRO) + ALA FIJA (SKYWALKER KIT)	183
6.3.1. Resultados del décimo tercer vuelo en San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2015	183
6.3.2. Resultados de los décimo cuarto y décimo quinto vuelos en la Finca de Matallana 2 y en La Mudarra (Valladolid). Año 2015	188
6.4. RESULTADOS FINALES	189
6.5. FACTORES DE ANÁLISIS	192
6.5.1. Método 1: cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor	194
6.5.2. Método 2: cámara fotográfica convencional y modificada + multirrotor	197
6.5.3. Método 3: cámara compacta RGB y cámara multiespectral de un sensor + ala fija (Skywalker kit)	199
6.6. ANÁLISIS MULTICRITERIO	201
CONCLUSIONES	205
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	209
BIBLIOGRAFÍA	215
ANEJOS	237
ANEJO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	237
ANEJO 2. AREA DE ESTUDIO	243
2.1. VILLARRAMIEL (PALENCIA)	241

2.2. SAN MATEO DE GÁLLEGO (ZARAGOZA)	245
2.3. SOTO DE CERRATO (PALENCIA)	249
2.4. SARRACÍN DE ALISTE (ZAMORA)	251
2.5. FUENSALDAÑA (VALLADOLID)	253
2.6. MATALLANA 1	255
2.7. SAN ISIDRO (LEÓN)	257
2.8. RIOFRÍO DE ALISTE (ZAMORA)	260
2.9. PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN (VALLADOLID)	264
2.10. MATALLANA 2	266
2.11. LA MUDARRA	269
ANEJO 3. COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL	272
ANEJO 4. FICHERO DE VUELO	274
ANEJO 5. LISTADO DE WATERBOXX ANALIZADOS	277
5.1. FUENSALDAÑA. AÑO 2013	277
5.2. FUENSALDAÑA. AÑO 2014	277
5.3. SOTO DE CERRATO. AÑO 2014	280
5.4. MATALLANA 1. AÑO 2014	283
5.5. SAN ISIDRO. AÑO 2015	287
5.6. RIOFRÍO DE ALISTE. AÑO 2015	289
5.7. PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015	293
5.8. SAN MATEO. AÑO 2015	295
ANEJO 6. INFORMES DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE LAS PARCELAS VOLADAS	298
6.1. SOTO DE CERRATO. AÑO 2013.	298
6.2. SARRACÍN DE ALISTE. AÑO 2013	300

6.3. FUENSALDAÑA. AÑO 2013	302
6.4. SOTO DE CERRATO. AÑO 2014	303
6.5. FUENSALDAÑA. AÑO 2014	304
6.6. MATALLANA 1. AÑO 2014	305
6.7. SAN ISIDRO. AÑO 2015	306
6.8. RIOFRÍO DE ALISTE. AÑO 2015	307
6.9. PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015	308
6.10. SAN MATEO. AÑO 2015	309
6.11. MATALLANA 2	311

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1.1. VIÑEDOS “O GRIFO”. PLANTACIONES ENTERRADAS EN ROCA VOLCÁNICA PARA PROTEGERLAS DEL VIENTO Y CONSERVAR EL AGUA DE LA LLUVIA. (FUENTE: HTTP://WWW.CROSSINGROADS.ES)	16
ILUSTRACIÓN 1.2. PARTES DE UN WATERBOXX	17
ILUSTRACIÓN 1.3. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL WATERBOXX. FUENTE: EL NORTE DE CASTILLA	18
ILUSTRACIÓN 1.4. WATERBOXX COLOCADO EN EL TERRENO	18
ILUSTRACIÓN 1.5. ESQUEMA DE UN WATERBOXX. FUENTE: GROASIS. PIETER HOFF. 2011.	19
ILUSTRACIÓN 1.6. DIFERENTES TIPOS DE WATERBOXX 1. 250WB; 2. 240WB; 3. 210WB; 4. PROTOTIPO1; 5. PROTOTIPO2	20
ILUSTRACIÓN 1.7. ESTADO DE LA DEGRADACIÓN DEL WATERBOXX TIPO 210WB (Nº3) TRASCURRIDOS CINCO AÑOS	20
ILUSTRACIÓN 2.1. A) CÁMARA CON SOPORTE; B) EMISORA DE RADIO CONTROL; C) SISTEMA DE PÉRTIGA O MÁSTIL. FUENTE: ORTIZ ET AL., 2013	25
ILUSTRACIÓN 4.1. LOCALIZACIÓN DE LAS PARCELAS OBJETO DE ESTA INVESTIGACIÓN	52
ILUSTRACIÓN 4.2. MICRODRONE MD4-1000	56
ILUSTRACIÓN 4.3. MULTIRROTOR OKTO XL CON CÁMARA TETRACAM MINI MCA-6	57
ILUSTRACIÓN 4.4. OCTOCÓPTERO UFOCAMXXL8 V3 CON DOS CÁMARAS OLYMPUS PEN EN EL GIMBAL. VISTA DESDE UN LATERAL Y DESDE ABAJO	59
ILUSTRACIÓN 4.5. COMPONENTES DEL SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO. FUENTE: HTTP://WWW.AIRELECTRONICS.ES/PRODUCTS/SOLUTIONS/SKYWALKER/	60
ILUSTRACIÓN 4.6. INICIANDO EL DESPEGUE DEL SKYWALKER	61
ILUSTRACIÓN 4.7. PREPARANDO LA CANON EOS 400D CON OBJETIVO CANON 20MM F/2,8 USM	62
ILUSTRACIÓN 4.8. AJUSTANDO CÁMARAS OLYMPUS PEN E-P1 NORMAL Y MODIFICADA EN EL GIMBAL	62
ILUSTRACIÓN 4.9. CANON A-810. FUENTE: CANON. 2014	63

ILUSTRACIÓN 4.10. TETRACAM MINI MCA-6 SITUADA EN EL GIMBAL DEL MICRODRONE MD4-1000	65
ILUSTRACIÓN 4.11. CÁMARA MULTIESPECTRAL TETRACAM ADC MICRO. FUENTE: TETRACAM. 2014	66
ILUSTRACIÓN 4.12. LEICA GPS SYSTEM 500 MODELO SR530 Y DETALLE DE SU PANTALLA EN FUNCIONAMIENTO	67
ILUSTRACIÓN 4.13. CHEQUEANDO EL VUELO” A TIEMPO REAL” (IZQUIERDA) Y POSICIONANDO UN WAYPOINT (DERECHA)	68
ILUSTRACIÓN 5.1. ANÁLISIS DE FLUJO GENERAL COMPARATIVO DE LOS TRES DIFERENTES MÉTODOS, SEGÚN LA COMBINACIÓN CÁMARA + AERONAVE EMPLEADA: MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES (IZQUIERDA), CÁMARA RGB + MODIFICADA (CENTRO) Y MULTIESPECTRAL DE SENSOR ÚNICO (DERECHA)	74
ILUSTRACIÓN 5.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA COMBINACIÓN CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES + MULTIRROTOR	76
ILUSTRACIÓN 5.3. TOMA DE IMÁGENES Y PLANCHA DE TEFLÓN PARA EL CALIBRADO DEL SENSOR	77
ILUSTRACIÓN 5.4. DISPOSICIÓN Y DETALLE DE TRES WATERBOXX EN LA EXPERIENCIA PREVIA A LOS VUELOS Y COMPOSICIÓN COLOREADA DESPUÉS DE APLICAR LOS TRATAMIENTOS DIGITALES CORRESPONDIENTES	78
ILUSTRACIÓN 5.5. DETALLE DE CASTANEA SATIVA EN UN WATERBOXX. AÑO 2011	79
ILUSTRACIÓN 5.6. MOMENTO DEL VUELO DONDE SE APRECIAN LOS JALONES	80
ILUSTRACIÓN 5.7. DETALLE DE UNA DE LAS ACACIAS DE SAN MATEO DE GÁLLEGO. AÑO 2012	83
ILUSTRACIÓN 5.8. MOMENTO DEL DESPEGUE DEL MULTIRROTOR OKTO XL PORTANDO LA TETRACAM MINI MCA-6, EN SAN MATEO DE GÁLLEGO	82
ILUSTRACIÓN 5.9. DISPOSICIÓN DE LOS PLANTONES EN FILAS EN LA PARCELA VALLADA DE SOTO DE CERRATO. AÑO 2013	83
ILUSTRACIÓN 5.10. ARCHIVOS DE ALINEAMIENTO A 10 M (IZQUIERDA), 15 M (CENTRO) Y 20 M (DERECHA)	84
ILUSTRACIÓN 5.11: COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR 5/4/2	85
ILUSTRACIÓN 5.12. CREACIÓN DEL MOSAICO CON EL MÓDULO ARCMAP DE ARCGIS 9.2	87

ILUSTRACIÓN 5.13. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA COMBINACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA + MULTIRROTOR	95
ILUSTRACIÓN 5.14. PUNTO DE CONTROL DE LA PARCELA DE SOTO DE CERRATO	97
ILUSTRACIÓN 5.15. PARCELA DE SARRACÍN. EJEMPLOS DEL PEQUEÑO PORTE DE ALGUNOS PLANTONES (IZQ) Y ZONA DE CLONES DE CEREZO DE GRAN PORTE (DER). AÑO 2013	98
ILUSTRACIÓN 5.16. DETALLE DE UN PLANTÓN DE PINO EN UN WATERBOXX Y RODEADO DE CARDOS AÑO 2013	99
ILUSTRACIÓN 5.17. PANORÁMICA DEL ESTADO DE LA PARCELA DE FUENSALDAÑA. AÑO 2013	99
ILUSTRACIÓN 5.18. DETALLE DE UNA DE LAS ENCINAS MICORRIZADAS DE MATALLANA 1 EN EL INTERIOR DE UN WATERBOXX.	100
ILUSTRACIÓN 5.19. PANORÁMICA DE LA PARCELA DE MATALLANA 1. AÑO 2014	101
ILUSTRACIÓN 5.20. DETALLE DE UN WATERBOXX CON DOS ESPECIES (IZQ) Y UNA MARRA (DER) EN SAN ISIDRO. AÑO 2015	101
ILUSTRACIÓN 5.21. PANORÁMICA DE LOS RODALES PARCIALMENTE VOLADOS EN SAN ISIDRO. FUENTE PROYECTO LIFE+ “LOS DESIERTOS VERDES”. AÑO 2015.	102
ILUSTRACIÓN 5.22. DIFERENTES VISTAS DE LA ESCOMBRERA DE LA CANTERA A CIELO ABIERTO DE RIOFRÍO DE ALISTE EN 2012 LAS DOS FOTOGRAFÍAS DE ABAJO Y EN 2015 LAS DOS DE ARRIBA.	103
ILUSTRACIÓN 5.23. MULTIRROTOR MIKROKOPTER UFOCAMXXL8 V3 ELEVÁNDOSE EN RIOFRÍO DE ALISTE	103
ILUSTRACIÓN 5.24: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL LEICA SR530 EN RIOFRÍO DE ALISTE	104
ILUSTRACIÓN 5.25. PANORÁMICA DE LA PARCELA DE PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015	104
ILUSTRACIÓN 5.26. DE IZQUIERDA A DERECHA Y DE ARRIBA ABAJO. EMISORA, MONITOREO DE LOS WATERBOXX, SOPORTE DE AMBAS CÁMARAS Y UN POSIBLE FALSO POSITIVO. AÑO 2015	105
ILUSTRACIÓN 5.27. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA COMBINACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA RGB Y CÁMARA MULTIESPECTRAL DE UN SENSOR + ALA FILA (SKYWALKER KIT)	108
ILUSTRACIÓN 5.28. EL SKYWALKER ESPERANDO EL MOMENTO DEL DESPEGUE	110

ILUSTRACIÓN 5.29. ACACIAS Y PINOS DE LAS PARCELAS DE SAN MATEO DE GÁLLEGO. AÑO 2015	110
ILUSTRACIÓN 5.30. DETALLE DE LA DISPOSICIÓN DE LOS WATERBOXX EN MATALLANA 2. AÑO 2015	111
ILUSTRACIÓN 5.31. ALTURA (IZQUIERDA) Y PERSPECTIVA DE LA COLOCACIÓN (DERECHA) DE LOS PLANTONES DE PINO EN WATERBOXX DE CARTÓN EN LA PARCELA DE LA MUDARRA. AÑO 2015	111
ILUSTRACIÓN 6.1. MOSAICO COMPLETO EN INFRARROJO COLOR DE LAS IMÁGENES A 13.7, 18 Y 22.5 METROS (DE IZQUIERDA A DERECHA)	119
ILUSTRACIÓN 6.2. ZONA COMÚN DE ESTUDIO EN LOS TRES MOSAICOS DEL VUELO A MENOR ALTURA (13.7 METROS)	120
ILUSTRACIÓN 6.3. PLANTA DE CASTAÑO. DE ARRIBA HACIA ABAJO: NDVI, SAVI, GREEN NDVI Y ACP Y DE IZQUIERDA A DERECHA VUELOS A 13.7, 18 Y 22.5 M	121
ILUSTRACIÓN 6.4. PLANTA DE ABEDUL. EN IMÁGENES DE LOS VUELOS A 13.7 M (CENTRO) Y 22.5 M (DERECHA). SE APRECIA CLARAMENTE SU VIGOR VEGETAL	122
ILUSTRACIÓN 6.5. PLANTONES DE <i>PINUS PINASTER</i> (IZQUIERDA) Y <i>QUERQUS ILEX</i> (DERECHA) EN SENDOS WATERBOXX	124
ILUSTRACIÓN 6.6. PLANTA DE PINO. DE ARRIBA HACIA ABAJO: NDVI, SAVI, GREEN NDVI Y ACP Y DE IZQUIERDA A DERECHA VUELOS A 13.7, 18 Y 22.5 M	124
ILUSTRACIÓN 6.7. PLANTA DE ENCINA. DE ARRIBA HACIA ABAJO: NDVI, SAVI, GREEN NDVI Y ACP Y DE IZQUIERDA A DERECHA VUELOS A 13.7, 18 Y 22.5 M	125
ILUSTRACIÓN 6.8. EJEMPLO DE MARRA A 22.5 M ANALIZADO MEDIANTE LOS ÍNDICES B) GNDVI, C) SAVI Y D) ACP. TOMADO DE GIL, ET AL., 2013	126
ILUSTRACIÓN 6.9. DETALLE DE LOS WATERBOXX CON EL FILTRO SOBEL APLICADO A LA IMAGEN ACP DEL VUELO DE 13.7 METROS DE ALTURA EN PLANTA VIVA DE CASTAÑO (D) EN MARRA DE PINO (E) Y EN MARRA DE CIPRÉS (F). TOMADO DE GIL, ET AL., 2013	127
ILUSTRACIÓN 6.10. ZONA COMÚN DE ESTUDIO PARA VISUALIZAR LOS RESULTADOS EN INFRARROJO COLOR	129
ILUSTRACIÓN 6.11. ÍNDICE NDVI EN PSEUDOCOLOR DE LA ZONA DE ESTUDIO	130
ILUSTRACIÓN 6.12. ÍNDICE GREEN NDVI EN PSEUDOCOLOR DE LA ZONA DE ESTUDIO	130
ILUSTRACIÓN 6.13. ÍNDICE SAVI EN PSEUDOCOLOR DE LA ZONA DE ESTUDIO	131

ILUSTRACIÓN 6.14. RECORTE DEL ACP DE LA ZONA DE ESTUDIO	131
ILUSTRACIÓN 6.15. DETALLE DE UN WATERBOXX CON ROBINIA PSEUDOACACIA A 15 M DE ALTURA, CON LOS CUATRO TRATAMIENTOS DIGITALES DE IZQUIERDA A DERECHA: NDVI, SAVI, GREEN NDVI Y ACP	133
ILUSTRACIÓN 6.16. DETALLE DE UNA MARRA DE <i>ROBINIA PSEUDOACACIA</i> EN UN WATERBOXX. DE IZQUIERDA A DERECHA: NDVI, SAVI, GREEN NDVI Y ACP	133
ILUSTRACIÓN 6.17. DETALLE DE DOS WATERBOXX CON EL FILTRO SOBEL APLICADO A LA IMAGEN ACP. A LA IZQUIERDA PLANTA VIVA DE <i>ROBINIA PSUDOACACIA</i> Y A DERECHA MARRA	134
ILUSTRACIÓN 6.18. MOSAICO DE MEDIA PARCELA GENERADO CON LAS IMÁGENES TOMADAS POR LA CÁMARA MULTIESPECTRAL EN SOTO DE CERRATO	137
ILUSTRACIÓN 6.19. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE (IZQUIERDA). EJEMPLO EN IR (DERECHA)	138
ILUSTRACIÓN 6.20. CAPTURA EN PERSPECTIVA DEL MODELO 3D CON LAS FOTOGRAFÍAS EN IRC	139
ILUSTRACIÓN 6.21. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	139
ILUSTRACIÓN 6.22. IMAGEN DEL ÍNDICE GREEN NDVI EN ESCALA DE GRISES DE LA PARCELA DE SOTO DE CERRATO	140
ILUSTRACIÓN 6.23. DETALLE DEL ÍNDICE GREEN NDVI EN ESCALA DE GRISES	140
ILUSTRACIÓN 6.24. IMAGEN GREEN NDVI PSEUDOCOLOR DE UNA PARTE DE LA ORTOFOTO	141
ILUSTRACIÓN 6.25. IMAGEN GREEN NDVI CON LA PALETA DE COLORES MODIFICADA PARA MEJORAR LA IDENTIFICACIÓN DE MARRAS	141
ILUSTRACIÓN 6.26. IMAGEN GREEN NDVI CON LA PALETA DE COLORES MODIFICADA. DETALLE DE UN WATERBOXX	142
ILUSTRACIÓN 6.27. DETALLE DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	142
ILUSTRACIÓN 6.28. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) E IRC (DERECHA)	143
ILUSTRACIÓN 6.29. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	144
ILUSTRACIÓN 6.30. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES. CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA: MUJ	

VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). Y CADA FILA DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE/RGB, COMPOSICIÓN 4/3/2, GREEN NDVI, ACP	145
ILUSTRACIÓN 6.31. COMPOSICIÓN 4/3/2	146
ILUSTRACIÓN 6.32. ÍNDICE GREENNDVI	147
ILUSTRACIÓN 6.33. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	148
ILUSTRACIÓN 6.34. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN IR (IZQUIERDA) Y VISIBLE/RGB (DERECHA)	149
ILUSTRACIÓN 6.35. CAPTURA EN PERSPECTIVA DEL MODELO 3D REALIZADO CON LAS FOTOGRAFÍAS EN VISIBLE	150
ILUSTRACIÓN 6.36. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	150
ILUSTRACIÓN 6.37. ZONIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE PLANTAS Y PUNTOS DE MUESTREO DE MARRAS REALIZADO EN CAMPO DENTRO DEL PROYECTO LIFE+: “LOS DESIERTOS VERDES”. (ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30N)	151
ILUSTRACIÓN 6.38. MARRA DE <i>PRUNUS AVIUM</i> (CEREZO), COLUMNA IZQUIERDA (A-D). PLANTA VIVA DE <i>PRUNUS AVIUM</i> (CEREZO), COLUMNA DERECHA (1-4)	152
ILUSTRACIÓN 6.39. TRANSICIÓN DE TRATAMIENTOS DIGITALES EN UN WATERBOXX CON PROYECCIONES NO COINCIDENTES EN CLONES DE <i>PRUNUS AVIUM</i> (CEREZO). VISIBLE/RGB, A; IRC, B; COMPOSICIÓN IRC/ROJO/VERDE (4/3/2), C; NDVI, D; GREEN NDVI, E; ACP, F	153
ILUSTRACIÓN 6.40. TRANSICIÓN DE TRATAMIENTOS DIGITALES EN UN WATERBOXX CON PROYECCIONES COINCIDENTES EN <i>PRUNUS AVIUM</i> (CEREZO). VISIBLE/RGB, A; IRC, B; COMPOSICIÓN IRC/ROJO/VERDE (4/3/2), C; NDVI, D; GREEN NDVI, E; ACP, F	154
ILUSTRACIÓN 6.41. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN IRC (IZQUIERDA) Y VISIBLE/RGB (DERECHA)	155
ILUSTRACIÓN 6.42. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	156
ILUSTRACIÓN 6.43. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES. CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE, COMPOSICIÓN 4/3/2, GREEN NDVI, ACP	156
ILUSTRACIÓN 6.44. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) E IRC (DERECHA)	158

ILUSTRACIÓN 6.45. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (ARRIBA) Y EN IRC (ABAJO)	158
ILUSTRACIÓN 6.46. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES. CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE (RGB), COMPOSICIÓN 4/3/2, GREEN NDVI, ACP	159
ILUSTRACIÓN 6.47. COMPOSICIÓN 4/3/2	160
ILUSTRACIÓN 6.48. ÍNDICE GREEN NDVI	161
ILUSTRACIÓN 6.49. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	161
ILUSTRACIÓN 6.50. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) E IRC (DERECHA)	162
ILUSTRACIÓN 6.51. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (ARRIBA) Y EN IRC (ABAJO)	162
ILUSTRACIÓN 6.52. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES DE <i>QUERQUS ILEX</i> (ENCINA). CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE, COMPOSICIÓN 4/3/2, GREEN NDVI, ACP	163
ILUSTRACIÓN 6.53. COMPOSICIÓN 4/3/2	164
ILUSTRACIÓN 6.54. ÍNDICE GREEN NDVI	165
ILUSTRACIÓN 6.55. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	165
ILUSTRACIÓN 6.56. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) E IRC (DERECHA)	166
ILUSTRACIÓN 6.57. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	166
ILUSTRACIÓN 6.58. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES. CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE, COMPOSICIÓN 4/3/2, GREEN NDVI, ACP	167
ILUSTRACIÓN 6.59. COMPOSICIÓN 4/3/2	169
ILUSTRACIÓN 6.60. ÍNDICE GREEN NDVI	170

ILUSTRACIÓN 6.61. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	171
ILUSTRACIÓN 6.62. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA). EJEMPLO EN IRC (DERECHA)	172
ILUSTRACIÓN 6.63. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	172
ILUSTRACIÓN 6.64. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES EN <i>JUNIPERUS COMUNIS</i> (ENEBRO). CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE, COMPOSICIÓN 4-3-2, GREEN NDVI, ACP	173
ILUSTRACIÓN 6.65. COMPOSICIÓN 4/3/2	175
ILUSTRACIÓN 6.66. ÍNDICE GREEN NDVI	176
ILUSTRACIÓN 6.67. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	177
ILUSTRACIÓN 6.68. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA). EJEMPLO EN IRC (DERECHA)	178
ILUSTRACIÓN 6.69. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	178
ILUSTRACIÓN 6.70. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES. CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: VISIBLE, COMPOSICIÓN 4-3-2, GREEN NDVI, ACP	179
ILUSTRACIÓN 6.71. COMPOSICIÓN 4/3/2	180
ILUSTRACIÓN 6.72. ÍNDICE GREENNDVI	181
ILUSTRACIÓN 6.73. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	182
ILUSTRACIÓN 6.74. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CAPTURADA EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) E IRC (DERECHA)	183
ILUSTRACIÓN 6.75. CONJUNTO DE IMÁGENES EN VISIBLE/RGB (IZQUIERDA) Y EN IRC (DERECHA)	184
ILUSTRACIÓN 6.76. TRATAMIENTOS DIGITALES REALIZADOS EN 3 TIPOLOGÍAS DE PLANTAS DIFERENTES PARA <i>PINUS HALEPENSIS</i> (PINO). CADA COLUMNA REPRESENTA UNA PLANTA. MUY VIGOROSA (IZQUIERDA), VIGOROSA (CENTRO) Y POCO VIGOROSA (DERECHA). DE ARRIBA ABAJO: COMPOSICIÓN 4/3/2, GREEN NDVI, ACP	184

ILUSTRACIÓN 6.77. COMPOSICIÓN 4/3/2	185
ILUSTRACIÓN 6.78. ÍNDICE GREEN NDVI	186
ILUSTRACIÓN 6.79. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	187

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES. ANEJOS

ILUSTRACIÓN 1. SITUACIÓN DE PARCELA DE VILLARRAMIEL. ESCALAS VARIAS	243
ILUSTRACIÓN 2. PARCELA DE VILLARRAMIEL (EN VERDE) ANTES DE LA PLANTACIÓN	244
ILUSTRACIÓN 3. VISTA AÉREA DE LA PARCELA DE VILLARRAMIEL CON UN DETALLE DE LA DISPOSICIÓN DE LOS WATERBOXX	244
ILUSTRACIÓN 4. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE SAN MATEO DE GÁLLEGO. ESCALAS VARIAS	245
ILUSTRACIÓN 5. LOCALIZACIÓN DE LA PARCELA DE SAN MATEO DE GÁLLEGO	246
ILUSTRACIÓN 6. VISTA AÉREA DE UNA PARTE DE LAS PARCELA B Y C DE SAN MATEO DE GÁLLEGO CON LA DISPOSICIÓN DE LOS WATERBOXX. AÑO 2012	246
ILUSTRACIÓN 7. PARCELAS DE SAN MATEO DE GÁLLEGO ANTES DE LA PLANTACIÓN. LAS PARCELAS MONITORIZADAS ESTÁN ROTULADAS COMO B (SE VOLÓ EN EL AÑO 2012) Y C (EN EL AÑO 2015). EN AMARILLO PUNTOS DE CONTROL SOBRE EL TERRENO DEL PROYECTO LIFE+: “LOS DESIERTOS VERDES”	247
ILUSTRACIÓN 8. DETALLE DE ORTOFOTO DEL VUELO DE LAS PARCELAS DE SAN MATEO DE GÁLLEGO INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. PARCELAS PARCIALMENTE MONITORIZADAS B Y C. AÑO 2015	248
ILUSTRACIÓN 9. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE SOTO DE CERRATO. ESCALAS VARIAS	249
ILUSTRACIÓN 10. ORTOFOTO DEL VUELO DE LA PARCELA DE SOTO DE CERRATO INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2014	251
ILUSTRACIÓN 11. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE SARRACÍN DE ALISTE (NÚMERO 2). ESCALAS VARIAS	249
ILUSTRACIÓN 12. ORTOFOTO DEL VUELO DE LA PARCELA DE SARRACÍN DE ALISTE INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2013	252
ILUSTRACIÓN 13. SITUACIÓN DE PARCELA DE FUENSALDAÑA. ESCALAS VARIAS	253
ILUSTRACIÓN 14. PARCELA DE FUENSALDAÑA CON PUNTOS DE MUESTREO DEL PROYECTO LIFE+: “LOS DESIERTOS VERDES”. EN AZUL ÁREA MONITORIZADA.	254

ILUSTRACIÓN 15. ORTOFOTO DEL VUELO DE LA PARCELA DE FUENSALDAÑA INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. EN AZUL PARCELA MONITORIZADA. AÑOS 2013 Y 2014	254
ILUSTRACIÓN 16. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE LA FINCA DE MATALLANA 1. ZONA A. ESCALAS VARIAS	255
ILUSTRACIÓN 17. ORTOFOTO DEL VUELO DE LA PARCELA DE MATALLANA 1 INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2014	256
ILUSTRACIÓN 18. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE SAN ISIDRO. ESCALAS VARIAS	257
ILUSTRACIÓN 19. ZONA MONITORIZADA DE SAN ISIDRO CON PUNTOS DE MUESTREO DEL PROYECTO LIFE+: “LOS DESIERTOS VERDES”	258
ILUSTRACIÓN 20. DETALLE DE LA ORTOFOTO DEL VUELO DE LAS PARCELAS ANALIZADAS EN SAN ISIDRO INSERTADAS EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	259
ILUSTRACIÓN 21. DETALLE DEL MODELO 3D DE LA PARTE VOLADA DE LA ESTACIÓN DE ESQUÍ DE SAN ISIDRO. SIN ESCALA. AÑO 2015	259
ILUSTRACIÓN 22. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE RIOFRÍO DE ALISTE (NÚMERO 1). ESCALAS VARIAS	260
ILUSTRACIÓN 23. ORTOFOTO GENERAL DEL VUELO DE LA CANTERA DE RIOFRÍO DE ALISTE INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	261
ILUSTRACIÓN 24. ORTOIMAGEN DETALLADA DE LA PARTE MONITORIZADA DE LA CANTERA DE RIOFRÍO DE ALISTE INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	261
ILUSTRACIÓN 25. DETALLE 1 MODELO 3D DE LA CANTERA DE RIOFRÍO DE ALISTE. SIN ESCALA	262
ILUSTRACIÓN 26. DETALLE 2 MODELO 3D DE LA CANTERA DE RIOFRÍO DE ALISTE. SIN ESCALA	262
ILUSTRACIÓN 27. DETALLE 3 MODELO 3D DE LA CANTERA DE RIOFRÍO DE ALISTE. SIN ESCALA	263
ILUSTRACIÓN 28. DETALLE 4 MODELO 3D DE LA CANTERA DE RIOFRÍO DE ALISTE. SIN ESCALA	263
ILUSTRACIÓN 29. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. ESCALAS VARIAS	264

ILUSTRACIÓN 30. ORTOFOTO DEL VUELO DE LA PARCELA DE PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. EN BLANCO, LA PARTE DE LA PARCELA MONITORIZADA. AÑO 2015	265
ILUSTRACIÓN 31. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE LA FINCA DE MATALLANA 2. (ZONA B). ESCALAS VARIAS	266
ILUSTRACIÓN 32. ZONA MONITORIZADA DE LA FINCA DE MATALLANA 2 CON PUNTOS DE MUESTREO DEL PROYECTO LIFE*: "LOS DESIERTOS VERDES"	267
ILUSTRACIÓN 33. ORTOFOTO DEL VUELO CON SKYWALKER DE LA PARCELA DE MATALLANA 2 INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	268
ILUSTRACIÓN 34. ORTOFOTO CON DETALLE DE LOS WATERBOXX DE LA ZONA MONITORIZADA DE LA PARCELA DE MATALLANA 2 INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	268
ILUSTRACIÓN 35. SITUACIÓN DE LA PARCELA DE LA MUDARRA. ESCALAS VARIAS	269
ILUSTRACIÓN 36. LOCALIZACIÓN DE LA PARCELA DE LA MUDARRA	270
ILUSTRACIÓN 37. ORTOFOTO DEL VUELO CON SKYWALKER DE LA PARCELA DE LA MUDARRA INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	271
ILUSTRACIÓN 38. ORTOFOTO DEL DETALLE DE LOS WATERBOXX DE LA ZONA MONITORIZADA DE LA PARCELA DE LA MUDARRA INSERTADA EN GOOGLE EARTH. SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE. AÑO 2015	271
ILUSTRACIÓN 39. DATOS DE VUELO RGB EN SOTO DE CERRATO. AÑO 2013	298
ILUSTRACIÓN 40. DATOS DE VUELO IRC EN SOTO DE CERRATO. AÑO 2013	299
ILUSTRACIÓN 41. DATOS DE VUELO RGB EN SARRACÍN DE ALISTE. AÑO 2013	300
ILUSTRACIÓN 42. DATOS DE VUELO IRC EN SARRACÍN DE ALISTE. AÑO 2013	301
ILUSTRACIÓN 43. DATOS DE VUELO RGB EN FUENSALDAÑA. AÑO 2013	302
ILUSTRACIÓN 44. DATOS DE VUELO RGB EN SOTO DE CERRATO. AÑO 2014	303
ILUSTRACIÓN 45. DATOS DE VUELO RGB EN FUENSALDAÑA. AÑO 2014	304
ILUSTRACIÓN 46. DATOS DE VUELO RGB EN LA FINCA DE MATALLANA 1. AÑO 2014	305

ILUSTRACIÓN 47. DATOS DE VUELO RGB EN SAN ISIDRO. AÑO 2015	306
ILUSTRACIÓN 48. DATOS DE VUELO RGB EN RIOFRÍO DE ALISTE. AÑO 2015	307
ILUSTRACIÓN 49. DATOS DE VUELO RGB EN PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015	308
ILUSTRACIÓN 50. DATOS DE VUELO RGB EN SAN MATEO DE GÁLLEGO. AÑO 2015	309
ILUSTRACIÓN 51. DATOS DE VUELO IRC EN SAN MATEO DE GÁLLEGO. AÑO 2015	310
ILUSTRACIÓN 52. DATOS DE VUELO RGB MATALLANA 2. AÑO 2015	311

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS UAVS TÁCTICOS. TRADUCIDA DE CHIABRANDO, F. ET AL., 2011.	29
TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PARCELAS VOLADAS DISPUESTAS EN ORDEN CRONOLÓGICO	54
TABLA 4.2. ESPECIFICACIONES DE LOS RPA UTILIZADOS EN LAS DISTINTAS EXPERIENCIAS	55
TABLA 4.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y PRECIO DE LAS CÁMARAS EMPLEADAS EN ESTA INVESTIGACIÓN	64
TABLA 5.1. CHEQUEO REALIZADO PARA COMPROBAR LA AUTONOMÍA DEL MICRODRONE MD4-1000	96
TABLA 5.2. RESUMEN DE LOS TRES DIFERENTES MÉTODOS EMPLEADOS EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	114
TABLA 6.1. MATRIZ DE VARIANZA-COVARIANZA PARA LOS 3 CANALES DEL MOSAICO	123
TABLA 6.2. AUTOVALORES Y VARIANZAS ASOCIADAS A CADA COMPONENTE	123
TABLA 6.3. MATRIZ DE AUTOVECTORES QUE MUESTRAN LA ASOCIACIÓN DE CADA CP A CADA UNA DE LAS BANDAS ORIGINALES	123
TABLA 6.4. MATRIZ DE CONFUSIÓN APLICADA AL CASTAÑO	128
TABLA 6.5. MATRIZ DE CONFUSIÓN APLICADA AL PINO	128
TABLA 6.6. MATRIZ DE CONFUSIÓN APLICADA A LA ENCINA	128
TABLA 6.7. MATRIZ DE CONFUSIÓN APLICADA AL ABEDUL	128
TABLA 6.8. MATRIZ DE VARIANZA-COVARIANZA PARA LOS CANALES DEL MOSAICO. VUELO A 15 METROS	132
TABLA 6.9. AUTOVALORES Y VARIANZAS ASOCIADAS A CADA CANAL. VUELO A 15 METROS	132
TABLA 6.10. MATRIZ DE AUTOVECTORES PROPIOS DE LA MATRIZ DE COVARIANZA. VUELO A 15 METROS	132
TABLA 6.11. TABLA DE CONFUSIÓN APLICADA A LA <i>ROBINIA PSEUDOACACIA</i>	135

TABLA 6.12. DATOS SIGNIFICATIVOS DE CADA VUELO	190
TABLA 6.13. EXACTITUD GLOBAL Y PORCENTAJE DE PLANTAS DUDOSAS FRENTE AL TOTAL ANALIZADO EN CADA ENSAYO	191
TABLA 6.14. MATRIZ MULTICRITERIO QUE RELACIONA EL MÉTODO EMPLEADO CON LOS FACTORES MÁS RELEVANTES ANALIZADOS	201

ÍNDICE DE TABLAS. ANEJOS

TABLA 1. FICHA TÉCNICA DEL MICRODRONE MD4-1000	237
TABLA 2. FICHA TÉCNICA DEL MIKROKOPTER UFOCAMXXL8 V3	237
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DEL ALA FIJA SKYWALKER	238
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA CANON EOS 400D	238
TABLA 5. ESPECIFICACIONES DEL OBJETIVO CANON 20MM F/2,8 USM	238
TABLA 6. FICHA TÉCNICA OLYMPUS PEN E-P1	239
TABLA 7. FICHA TÉCNICA DEL OBJETIVO M. ZUIKO DIGITAL ED 12MM F2	239
TABLA 8. ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA CANON A-810	240
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS CANALES DE LA CÁMARA MULTIESPECTRAL TETRACAM MINI MCA-6	240
TABLA 10. FICHA TÉCNICA DE LA CÁMARA MULTIESPECTRAL TETRACAM MINI MCA-6	241
TABLA 11. ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA MULTIESPECTRAL TETRACAM ADC MICRO	241
TABLA 12. ESPECIFICACIONES DEL MODELO SR530 DEL SISTEMA LEICA GPS SYSTEM 500	242
TABLA 13. COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	272
TABLA 14. EJEMPLO DE FICHERO DE VUELO DE LA PARCELA DE VILLARRAMIEL. AÑO 2012	274
TABLA 15. COORDENADAS DE PLANTAS DUDOSAS EN FUENSALDAÑA. AÑO 2013. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	277
TABLA 16. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN FUENSALDAÑA. AÑO 2014. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	277
TABLA 17. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN SOTO DE CERRATO. AÑO 2014. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	280
TABLA 18. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN MATA LLANA. AÑO 2014. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	283

TABLA 19. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN SAN ISIDRO. AÑO 2015. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	287
TABLA 20. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN RIOFRÍO DE ALISTE. AÑO 2015. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	289
TABLA 21. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015. (ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30N)	293
TABLA 22. COORDENADAS DE PLANTAS ANALIZADAS EN SAN MATEO. AÑO 2015. (SISTEMA ETRS89, PROYECCIÓN UTM HUSO 30 NORTE)	295



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Una de las consecuencias más devastadoras del cambio climático es el avance de la desertificación. Estudios realizados ponen de manifiesto que durante el siglo XX las temperaturas en España se han incrementado de manera generalizada y en magnitud superior a la media global. Asimismo, las precipitaciones durante este periodo han tendido a la baja, sobre todo en la parte meridional y Canarias, aunque su alta variabilidad impide un juicio más preciso (Moreno, De la Rosa, & Zazo, 2005). Refiriéndose también al sureste peninsular, y en estudios más recientes, se ha constatado el aumento de las temperaturas y el descenso de las precipitaciones medias anuales (Olivar, Bogino, Spiecker, & Bravo, 2015). Pérez Abellán (2015) amplía el territorio afectado y nos avisa de la gravedad del efecto del cambio climático en España que, según sus predicciones, será uno de los más intensos de la zona climática a la que pertenecemos. Debido al desplazamiento del calendario de las lluvias, este hecho puede traer graves consecuencias en el sector agrario.

Para contribuir a paliar este efecto se han realizados estudios que proponen cambios de uso del suelo, como la repoblación forestal, de tal modo que se puedan atenuar ligeramente los efectos del cambio climático (García-Valdés, Svenning, Zavala, Purves, & Araújo, 2015). Esto no es nada fácil si tenemos en cuenta que el éxito de una plantación en zonas áridas y/o semiáridas está condicionado por diversos factores que pueden provocar el estrés de la planta. Tambussi (2005) nos señala que, ante los posibles efectos del cambio climático, el conocimiento de estos factores de estrés en los vegetales puede resultar decisivo para la elaboración de modelos predictivos de la naturaleza.

Encontramos estudios que han analizado estos factores realizando propuestas de enumeración y clasificación (Mano, 2002; Azcón-Bieto & Talón, 2008). Otros estudios anteriores, recogidos en el trabajo de Delgado, Dema, & Calzada (2004), ya habían identificado el estrés hídrico como uno de los principales factores que limitan el establecimiento de los plantones en ambientes mediterráneos debido a la escasa disponibilidad de agua, especialmente durante los periodos de estío (Di Castri, Goodall, & Specht, 1981; Haase & Rose, 1993). Esto pone de manifiesto que las actuaciones que se realicen en medios áridos y/o semiáridos deben intentar proveer a la raíz de la planta la humedad necesaria para intentar sobrevivir al primer verano (Burdett, 1990).

Son precisamente las condiciones ambientales de determinadas zonas de la Península Ibérica, tales como las altas temperaturas, los suelos pobres, la elevada radiación y evaporación y, en especial, la escasez de precipitaciones y condiciones extremas, las que

han generado que los proyectos de restauración llevados a cabo en esas zonas hayan obtenido un éxito limitado, con una elevada proporción de plantas muertas y cuantiosos gastos de reposición (Marcos et al., 2013).

Aun considerando el riego como una práctica inviable para la mayoría de los proyectos de restauración forestal, Martínez de Azagra & Del Río (2012) compararon los diferentes sistemas de irrigación que pueden ser utilizados en la plantaciones forestales de zonas secas. En su estudio, clasificaron los sistemas de irrigación en función de su eficiencia de aplicación, coste, adaptabilidad y mantenimiento. Los sistemas clasificados fueron los siguientes: microrriego a través de recipientes enterrados o superficiales, microrriego por medio de tubos verticales, riego subterráneo mediante drenes, riego por goteo procedente de la destilación solar y riego mediante cajas de agua.

Ha sido el riego mediante cajas de agua lo que ha constituido el objeto de estudio del Proyecto Europeo LIFE+ “Los Desiertos Verdes: nuevas técnicas de plantación de árboles en ambientes desérticos para enfrentarse al cambio climático” (LIFE09 ENV/ES/447), realizado durante el período 2010-2015. Este proyecto tiene como finalidad contribuir a disminuir la desertificación como una de las consecuencias más devastadoras del cambio climático. Para atender a esta finalidad, su objetivo principal está orientado a buscar una solución que sea viable y que permita incrementar el éxito en la supervivencia de especies forestales en suelos muy degradados y climas áridos, utilizando la adaptación de nuevas tecnologías. Para ello se va a utilizar un material, invento del Pieter Hoff, que se llama Waterboxx (©Groasis) o “caja de agua”.

Se trata de una caja de forma redondeada de 50 cm de diámetro, con una zona tubular en el centro donde se planta un árbol de una savia. Este recipiente, que se entierra ligeramente, está diseñado para atrapar el agua de la condensación producida por el rocío y por las lluvias ocasionales. El agua retenida en su depósito interior, bien aislado y de unos 15 litros de capacidad, se dosifica al brinzal en pequeñas cantidades por ósmosis, mediante una simple mecha. El Waterboxx está ideado para que, tan pronto como las raíces de las plantas generen su propio sistema capilar pivotante y se hundan en el interior del suelo, pueda ser retirado (generalmente a los 2 años después de su plantación) y reutilizado de nuevo. Con este recipiente, capaz de suministrar agua a los plantones en los primeros estadios de su vida y que tiene un notable efecto termoaislante, se pretende obtener tasas de supervivencia que permitan, aún a costa de un presupuesto elevado, repoblar en condiciones extremas donde es prácticamente imposible el arraigo de las plantas.

Con el fin de determinar el éxito o fracaso de una repoblación en el sector forestal, invariablemente se ha recurrido al análisis de la supervivencia, o bien al contrario, de la mortalidad de las plantas y para ello se utiliza el término *marra*. Según la RAE (Real Academia Española de la Lengua) *marra* se define como “la falta de una cosa donde debiera estar” y lo sitúa en el ámbito de las plantas leñosas (pone de ejemplo el olivo y la vid). Así pues podemos hablar de plantas muertas o de *marras* para referirnos a la misma situación, falta de planta debido a cualquier causa de muerte ocurrida en la plantación.

En el marco del citado proyecto, un equipo de investigadores de la Universidad de Valladolid, en colaboración con la Universidad de Santiago de Compostela, ha realizado el seguimiento de aquellas parcelas que se seleccionaron para estudio con el fin de averiguar la tasa de supervivencia de la planta en *Waterboxx* frente a las plantas testigo.

En cada una de las parcelas se han plantado diferentes especies propias de la zona para asegurar su adaptabilidad a la climatología y a las características edáficas propias de los terrenos. Como rasgo común a todas ellas está el hecho de que se encuentran situadas en lugares inhóspitos, a veces inaccesibles, con suelos muy degradados y climas áridos o semiáridos. Así, de este modo, se han seleccionado escombreras de canteras de pizarra a cielo abierto, vertederos en proceso de restauración, áreas rocosas de alta montaña y parcelas situadas en parajes desérticos. Todas ellas quedan ubicadas en el territorio geográfico peninsular.

El modo de acometer dicho análisis ha consistido en la utilización de un muestreo sistemático tradicional (Mostacedo & Fredericksen, 2000). Este método para la toma de muestras se realiza mediante la observación, a pie de campo, de un 5% de las plantas, comenzando desde un punto elegido al azar y siguiendo un determinado patrón, de manera sistemática. El técnico procede a anotar en un estadillo el estado fenológico de cada especie de manera individual y georreferencia cada muestra con GPS, con la finalidad de realizar un inventario geolocalizado de todas las plantas monitorizadas. Dichas observaciones deben realizarse anualmente siendo preciso planificar un seguimiento que se prolongue durante los primeros años, puesto que éstos son claves para garantizar su viabilidad (Neumann & Landis, 1995). Además, puesto que las parcelas se encuentran en zonas de orografía complicada, con lugares difícilmente accesibles y en ambientes climatológicos extremos, la labor de inspección mediante este método se vuelve costoso y complejo.

La presente Tesis Doctoral tiene como finalidad indagar en otra metodología alternativa cuyo desarrollo permita identificar las plantas vivas y las *marras*, en las diferentes plantaciones

con Waterboxx, mediante cámaras espectrales aeroportadas con RPAS (aeronaves no tripuladas, pilotadas remotamente, *Remotely Piloted Aircraft*). Así, se podría facilitar la determinación de un mayor número de plantas de manera fiable y a bajo coste, reemplazando el método tradicional de muestreo sistemático.

Ha sido el avance tecnológico de los últimos años, el que ha permitido un desarrollo vertiginoso de RPAS cuyo uso, se ha orientado a las empresas y a usuarios particulares ofreciéndoles unas prestaciones cada vez más avanzadas (Gil et al., 2013). Esta tecnología se desarrolló inicialmente con fines militares pero sus enormes posibilidades de aplicación en multitud de campos ha favorecido su rápida adopción y su coste se ha visto reducido enormemente. Estas plataformas aéreas, controladas por control remoto, de forma semi-autónoma o autónoma permiten elevar sensores o dispositivos de captación de datos (Eisenbeiß, 2009) hasta una altura predeterminada para captar, a nivel de suelo, la huella de pixel necesaria siendo incluso posible visualizar esos datos en tiempo real, desde tierra (Kerle, Heuel, & Pfeifer, 2008).

Estudios han demostrado que la teledetección es una ciencia capaz de determinar con precisión el vigor vegetal de las masas forestales (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2014; Santos et al., 2014), pero hasta hace unos pocos años su uso estaba restringido a las imágenes obtenidas por medio de los satélites comerciales. Aunque la resolución espacial, de los sensores espectrales que portan, ha ido incrementándose con el paso de los años, el tamaño de los plantones, en los primeros estadios de vida, impide que las imágenes digitales tomadas por estos sensores puedan situar un cierto número de píxeles en cada planta para determinar con garantías su estado fenológico. Además, la resolución temporal también puede dificultar las determinaciones en ciertos momentos cruciales del ciclo vegetativo.

En 2011, cuando iniciamos la investigación de la presente Tesis Doctoral, enmarcada en el Proyecto Europeo LIFE+ “Los Desiertos Verdes”, apenas disponíamos de RPAS para usos civiles. La empresa a la que acudimos para realizar nuestro primer vuelo, Cartogalicia, era la única que vendía estos aparatos en el país. Hoy, sin embargo, el número de empresas ha aumentado considerablemente y es difícil decidirse entre los diferentes modelos. Durante esos primeros años, cualquier usuario estaba capacitado para volarlos, no había restricciones de uso. Hoy en día existe una legislación al respecto. AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea) ha creado una normativa temporal (Ley 18/2014, publicada en BOE de 15 de octubre de 2014) y ya son más de 335 los operadores habilitados para pilotar RPAS tras un año de regulación.

En nuestro proyecto, nos interesaba indagar en el tipo de cámara multiespectral más adecuada para su transporte con RPA. La finalidad de la investigación era averiguar si sus imágenes digitales tomadas a baja altura serían capaces de ayudarnos en la discriminación de plantas vivas y muertas en Waterboxx. Pensamos que si fuese posible aplicar una nueva metodología para la detección de marras, nos evitaría en el futuro tener que desplazarnos varias jornadas para tomar datos reales de campo y así abaratar los costes en mano de obra y ganar seguridad, al encontrarse las parcelas en lugares de difícil accesibilidad.

Durante la vida del proyecto (2010-2015) fueron surgiendo retos que nos impulsaron a buscar nuevas experiencias con cámaras modificadas y otras multiespectrales más ligeras y de mayor resolución. Estas decisiones fueron generando cambios en la metodología. Para ello, en esta Tesis Doctoral, se han realizado 15 ensayos en 11 parcelas diferentes de 5 provincias (Palencia, Valladolid, Zamora, León y Zaragoza). Además se han testado 3 métodos basados en 3 combinaciones de RPAS + cámaras multiespectrales y/o cámaras modificadas, con el objetivo de averiguar la metodología que pudiera ser más apropiada para nuestra finalidad de ahorrar costes frente al procedimiento tradicional de muestreo en campo.

Los recientes avances tecnológicos muestran una tendencia hacia la disminución del tamaño y peso de las cámaras multiespectrales a la vez que se incrementa su resolución espacial y se aquilata su precio. Con los RPAS también ocurre algo parecido, por todo esto pensamos que esta línea de investigación que presentamos en esta Tesis Doctoral puede aportar experiencias en un campo novedoso y con un gran potencial dentro del sector agrario.

Esta Tesis Doctoral se ha estructurado en 3 grandes bloques o partes:

- Parte I. Antecedentes.
- Parte II. Material y métodos.
- Parte III. Resultados.

La Parte I. Antecedentes tiene como finalidad delimitar el estado de la cuestión acudiendo a aquellos estudios que permitan la construcción de un marco teórico-conceptual. Así, en el capítulo 1: la supervivencia de las plantas en zonas áridas, se aborda la actual problemática de los métodos tradicionales de muestreo en plantaciones forestales y cultivos agrícolas y la importancia del uso de tecnologías que favorezcan el arraigo en climas áridos y suelos degradados. Posteriormente nos centramos en el uso del Waterboxx como instrumento que

contribuye a aumentar la supervivencia de las plantas en zonas con graves problemas de arraigo.

En el capítulo 2: sistemas de monitorización mediante plataformas de elevación y sensores aeroportados, se acude a aquellas investigaciones que han desarrollado el uso de sensores elevados mediante plataformas aéreas no tripuladas, el uso de cámaras y sensores que por su tamaño y resolución pueden ir en estos vehículos, el tratamiento digital de las imágenes y las aplicaciones en ingeniería del uso combinado de los RPAS y de las cámaras espectrales.

Esta primera parte finaliza con el capítulo 3: objetivos, cuya finalidad es definir el objetivo principal y los objetivos específicos de la investigación. El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es establecer una metodología que, de un modo fiable, permita la determinación de las plantas vivas y de las marras mediante el uso combinado de RPAS y cámaras espectrales. Este objetivo general se concreta en diferentes objetivos específicos.

La Parte II: Material y métodos se inicia con el capítulo 4: material. En él, hacemos referencia a la situación geográfica de aquellas parcelas en las que se han realizado los vuelos y a las especies plantadas en cada una de ellas. A continuación se describen de manera individualizada los diferentes materiales empleados en el desarrollo de la investigación: plataformas de vuelo, cámaras multiespectrales y cámaras convencionales modificadas para la captación del infrarrojo cercano (IRc), sistema de posicionamiento global (GPS) y software aplicado en todo el proceso.

Posteriormente, en el capítulo 5: métodos, se da cuenta del procedimiento utilizado para la realización de cada uno de los ensayos: la toma de datos, el procesado previo de las imágenes, la obtención de los mosaicos y georreferenciación y el tratamiento digital final previo al análisis de los resultados.

Para ello se ha seguido una única metodología que se ha subdividido en tres métodos, según la combinación RPA + sensor empleada, clasificando los ensayos por parcela y orden cronológico:

- Cámara multiespectral de 6 canales (Tetracam Mini MCA-6 digital) + multirrotor
- Cámara fotográfica convencional y modificada (Olympus PEN E-P1) + multirrotor
- Cámara compacta RGB y cámara multiespectral de un sensor (ADC Micro) + ala fija (Skywalker KIT)

El capítulo finaliza con una tabla resumen de los tres métodos utilizados, los materiales empleados en cada una de ellos y la causa de cambio y la diferencia o avance tecnológico sucedido que ha supuesto un proceso evolutivo en la investigación.

La parte III. Resultados está constituida por el capítulo 6: resultados y discusión. Para facilitar el seguimiento del desarrollo del proceso de investigación, se presentan los resultados siguiendo el mismo esquema que en el capítulo anterior: método, parcela y orden cronológico. Los resultados se describen y analizan de manera pormenorizada, haciendo hincapié en el modo en que se han obtenido y calculando el índice de Exactitud Global (número total de aciertos frente al total de plantas analizadas) alcanzado en cada una de las parcelas y el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado.

Además se evalúan los 10 factores que, atendiendo a los resultados, se muestran más relevantes para implementar la metodología: tipología de planta, facilidad de detección sobre Waterboxx, altura de vuelo, tipo de sensor, conjunto aeronave + sensor, tratamientos digitales, software empleado, eficiencia de la metodología, tamaño de las parcelas y exactitud en el cálculo de marras.

Los resultados obtenidos en este proceso de análisis se organizan en una matriz multicriterio con la finalidad de decidir cuál de las tres alternativas (combinación sensor / aeronave) estudiadas es la que mejor se adapta a nuestra problemática aportando los criterios objetivos necesarios.

Se cierra esta Tesis Doctoral con la exposición de las conclusiones finales obtenidas a raíz del análisis de los resultados y respondiendo a los objetivos planteados al inicio de la investigación. Además, en base a estas conclusiones se propone a la comunidad científica una serie de líneas futuras de investigación.

**P
A
R
T
E
I**

ANTECEDENTES



CAPÍTULO 1

LA SUPERVIVENCIA DE LAS PLANTAS
EN ZONAS ÁRIDAS



1.1. PLANTACIONES AGROFORESTALES EN ZONAS ÁRIDAS

El proceso de arraigo propuesto por Burdett (1990) es uno de los más aceptados y referidos en la literatura e indica que, una vez plantado el brinjal, éste debe recuperarse del posible estrés sufrido durante su manejo y establecer un contacto entre sus raíces y el suelo que le permita retomar las funciones vitales de absorción de agua y nutrientes en el nuevo ambiente. Este autor también consideró que los factores que aportan estrés a la planta en el momento del establecimiento, tienen una influencia decisiva en la supervivencia inicial y centró su investigación en el factor que consideró más importante, el estrés hídrico.

Tambussi (2005) aclaró que el conocimiento de estos factores de estrés en los vegetales puede resultar crucial para la elaboración de modelos predictivos de la naturaleza, ante los posibles efectos del cambio climático. El estrés en la planta puede ser producido por factores bióticos o abióticos (Azcón-Bieto & Talón, 2008). Los primeros son causados por la acción de seres vivos y los segundos, dependiendo del agente causal, pueden dividirse en físicos y químicos. Entre los factores físicos se encuentran: el estrés por déficit o exceso de agua, las temperaturas extremas (incluida la congelación), la salinidad y la radiación ultravioleta y, entre los químicos, destacan la contaminación atmosférica por metales pesados, determinadas carencias de elementos minerales y elevados niveles de toxinas.

Según Mano (2002), los factores medioambientales que mayor estrés producen en las plantas son el agua (tanto a nivel de falta como de encharcamiento del suelo), las temperaturas extremas, la salinización del suelo y el viento fuerte. Si se escogen las plantas teniendo en cuenta la mayor adaptación posible a estos factores se puede compensar en parte el posible fracaso de la repoblación; no obstante hay dos que son ciertamente limitantes e incontrolables en los primeros momentos tras el trasplante: el agua y la temperatura.

El estrés hídrico es uno de los principales factores que limitan el establecimiento de los plántones en ambientes mediterráneos (Di Castri, Goodall, & Specht, 1981; Haase & Rose, 1993) siendo el riego una práctica inviable en la mayoría de los proyectos de restauración forestal. Aunque el estrés inicial puede no causar la muerte de forma inmediata (Grossnickle, 2000), la planta se ha mostrado capaz de ajustar su morfología y fisiología, lo que supone un importante paso para su establecimiento en campo. Sin embargo, en ambientes con una acusada sequía estival, como el Mediterráneo o el interior peninsular, esta fase, y no la inmediatamente posterior al trasplante, es la que normalmente provoca una mayor mortalidad (Maestre, Cortina, Bautista, & Bellot, 2003).

El éxito de una plantación en zonas áridas o semiáridas está condicionado principalmente por la disponibilidad de agua, especialmente durante los períodos de máximo estrés hídrico (Delgado, Dema, & Calzada, 2004). Así pues, las actuaciones llevadas a cabo en estos medios, deben intentar proveer a la raíz de la planta la humedad necesaria para sobrevivir al primer verano (Burdett, 1990), empleando para ello diferentes metodologías como: protectores de planta, microrriegos, acolchados, hidrogeles, biberones, el método PLASA y las preparaciones adecuadas del terreno, como las microcuencas y la oasisificación (Martínez de Azagra & Mongil, 2001). A pesar del empleo de todas estas técnicas, las marras (plantas muertas) en las repoblaciones son muy elevadas. Se asume que el final de un estrés de trasplante tiene lugar cuando los atributos fisiológicos retornan a un nivel "normal", al cabo de uno o dos años.

Para garantizar la supervivencia en su primer año de plantación es pues necesario acudir a sistemas de riego localizado e intentar racionalizar el uso del agua. Martínez de Azagra & Del Río (2012) compararon en un estudio los diferentes sistemas de irrigación que se pueden utilizar en la plantaciones forestales en zonas secas y realizaron una minuciosa descripción en función de su eficiencia de aplicación, coste, adaptabilidad y mantenimiento. Para ello, clasificaron los sistemas en cinco grandes grupos: microrriego a través de recipientes enterrados o superficiales, microrriego por medio de tubos verticales, riego subterráneo mediante drenes, riego por goteo procedente de la destilación solar y riego mediante cajas de agua.

Bainbridge (2002) determinó que pequeños tarros de barro (botos), enterrados junto al sistema radicular de los plantones y llenados de agua periódicamente, eran capaces de aportar el agua necesaria para que éstos sobrevivieran. El mantenimiento de este sistema es costoso por la mano de obra que conlleva su relleno. Variantes de este sistema son las cápsulas porosas interconectadas unas con otras formando una especie de red de tuberías (Silva, da Silva, Gheyi, & Porto, 1984), o mediante botellas recicladas de plástico. Este peculiar sistema consiste en conectar varias botellas de 1,5 ó 3 litros y enterrarlas juntas cerca de la raíz del plantón, suministrándole agua lentamente a través de unos goteros (Matorel, 1998). Estos reservorios hídricos también necesitan recargarse y su duración se estima próxima al mes. En general, este sistema de microrriegos con diferentes materiales es bastante eficiente y de mantenimiento medio.

El segundo grupo, microrriego por medio de tubos verticales, es también un sistema eficiente y de coste no muy elevado. En un experimento realizado en Almería (Sánchez, Oller, Muñoz, Ruiz, & de Idaola, 2004) utilizaron tubos de polietileno enterrados de 5 mm de

diámetro para depositar el agua cerca de las raíces, a 25 cm de profundidad. De esta manera, consiguieron localizar el agua en torno a la raíz de la planta. El riego se puede realizar de manera individual o formando una red de tuberías lográndose porcentajes de supervivencia cercanos al 95 % con dosis mínimas de agua (máximo 3 litros de agua en cada riego).

El tercer grupo, riego subterráneo mediante drenes, se realiza a través de tuberías corrugadas de PVC con pequeños agujeros que se entierran abarcando toda la parcela. A intervalos apropiados se instala un tubo vertical para el llenado mediante un camión cisterna. Con este sistema, de buena eficiencia pero elevado coste y mantenimiento, se consigue una buena dotación hídrica pero sólo es práctico en pequeñas zonas puntuales por la importante infraestructura necesaria que impide que sea rentable.

El cuarto grupo lo forman los destiladores solares capaces de reproducir de manera limitada el ciclo del agua terrestre. Un ejemplo de ello es el Kondenskompressor (o Komkom) que está formado por dos botellas de diferente tamaño situadas una dentro de la otra. La mayor hace de campana y la menor de depósito de agua. Ambas se colocan junto al sistema radicular de la planta y por destilación se produce el riego con una dotación mínima. La eficiencia es alta, el coste bajo y el mantenimiento bajo.

El último de los grupos es el denominado riego mediante cajas de agua. Estas cajas de agua también llamadas Waterboxx (©Groasis) son unas cajas de polipropileno cuya finalidad es captar agua del rocío y de la lluvia para resguardarla en su interior y proporcionársela a la planta en pequeñas dosis en el periodo de máxima necesidad (Marcos et al., 2013). Es un sistema muy eficiente, con buena adaptabilidad a lugares remotos, de bajo mantenimiento pero de elevado coste, unos 14 euros más la mano de obra. Esta novedosa tecnología ha sido testada en el Proyecto Europeo del Programa LIFE + “Los Desiertos Verdes” que tiene como objetivo principal demostrar la validez y utilidad del Waterboxx para la supervivencia de los árboles plantados en suelos muy degradados y zonas de extrema aridez.

Curiosamente, encontramos una técnica similar al uso del Waterboxx en el archipiélago canario para el cultivo de la vid. Esta zona, está condicionada por la escasez de agua y por la roca volcánica. Por ello, es habitual el uso de construcciones para el almacenaje del agua y la conservación de la humedad. La zona más característica se encuentra en el municipio vitivinícola de La Geria, en la isla de Lanzarote donde se forma un paisaje casi lunar. Las cepas de las vides están plantadas en grandes hoyos, con forma de cono invertido, y revestidas con un material volcánico conocido como “lapilli”. Estos fragmentos de lava tienen

la cualidad de retener la humedad del ambiente durante la noche y, filtrarla hacia el terreno que se encuentra debajo. La humedad queda imbuida en el subsuelo por una capa inferior de composición caliza, y todo el conjunto se rodea con un muro de piedra, en forma de semicircunferencia, para proteger a la planta de los efectos del viento y de los arrastres. Con este ingenioso mecanismo, a modo de esponja, se puede aprovechar la humedad que traen los vientos alisios y de esta manera se puede proporcionar el agua necesaria a las raíces de las plantas por ósmosis (ilustración 1.1).



Ilustración 1.1. Viñedos “O Grifo”. Plantaciones enterradas en roca volcánica para protegerlas del viento y conservar el agua de la lluvia. (Fuente: <http://www.crossingroads.es>)

1.2. EL PROYECTO LIFE+ “LOS DESIERTOS VERDES”

El Proyecto LIFE+ Los Desiertos Verdes (2010–2015) (<http://www.losdesiertosverdes.com/>), tiene como principal objetivo demostrar la viabilidad técnica y económica de la aplicación a gran escala de una tecnología innovadora para la plantación de árboles en zonas de suelos degradados y climas áridos. Dicha tecnología se conoce comercialmente con el nombre de Waterboxx(©Groasis) (<https://www.groasis.com/es>).

Con esta finalidad se han seleccionado escombreras, vertederos, zonas rocosas de alta montaña y parcelas en parajes desérticos en 5 zonas de la Península Ibérica: Ríofrío de Aliste (Zamora); San Mateo de Gállego (Zaragoza); Fuensaldaña, Pedrajas de San Esteban, Villalba de los Alcores, Roales de Campos, Monasterio de Vega, Castronuevo de Esgueva, Iscar y Alcazarén (Valladolid); la estación de esquí de San Isidro (León) y San Boi de Llobregat (Barcelona). Se han plantado en 63 ha, brinzales de una savia de diferentes especies en Waterboxx. Todos los ensayos tienen un denominador común, los suelos y el clima dificultan enormemente el éxito de la supervivencia de la población. Para poder comprobar la tasa de supervivencia de las plantas con y sin Waterboxx, también se han plantado un 5% de plantas testigo.

Los socios del proyecto son: Universidad de Valladolid, Diputaciones (Valladolid y León), Ayuntamientos (Riofrío de Aliste, San Mateo de Gállego y San Boi de Llobregat) y empresas: Groasis (Holanda), Sylma (Bélgica) y Transfer Latin Business Consultancy (Barcelona).

1.2.1. El Waterboxx: tecnología y tipos

El Waterboxx (©Groasis) es una caja de polipropileno cuya finalidad es captar agua y resguardarla en su interior. Posteriormente, en el periodo de máxima necesidad, el agua se proporciona a la planta en pequeñas dosis (Marcos et al., 2013). Sus dimensiones son de 50 cm de diámetro y 25 cm de altura y su vida media se estima entre 5 y 10 años, dependiendo de su composición.

Esta herramienta, cuya patente es del holandés Pieter Hoff, consta de tres partes que se ensamblan antes de su colocación en el campo. La parte superior (ver ilustración 1.2), tiene unos canales en pendiente, que dirigen el líquido hacia dos sumideros centrales y, una tapa, que sirve de comprobación de la altura de agua y de llenado. La parte inferior constituye un reservorio de unos 15 litros de capacidad donde se acumula el agua recogida. De su base sale una mecha que atraviesa un estrecho canal y queda en contacto con el suelo. La parte central consta de una tapa aislante de color oscura que tiene funciones de separación y aislamiento entre una parte y otra.



Ilustración 1.2. Partes de un Waterboxx

El Waterboxx tiene dos huecos en el centro para permitir el crecimiento de dos brinzales (como máximo), que quedan protegidos tanto de las alimañas como de las inclemencias meteorológicas. Su mecanismo de funcionamiento es sencillo y muy efectivo. Por un lado, recoge el agua de lluvia caída en el otoño y en las tormentas de primavera. Por otro, captura las gotas del rocío que se condensan debido a la diferencia térmica entre el día y la noche y que resbalan por los canales hacia los dos sifones centrales de color azul. El agua se almacena en su interior y gracias a la mecha, en contacto con el suelo, se suministran pequeñas dosis de manera regular al sistema radicular de la planta (ilustración 1.3).

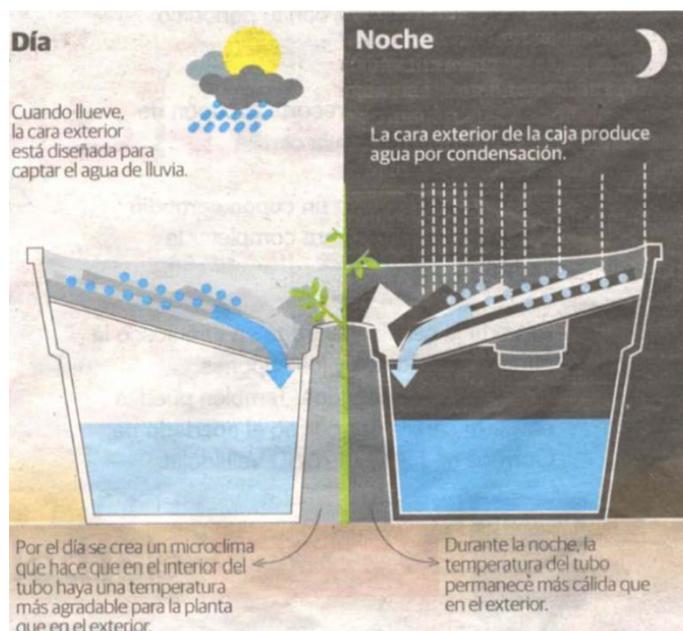


Ilustración 1.3. Esquema de funcionamiento del Waterboxx. Fuente: El Norte de Castilla

Para su correcta colocación, el Waterboxx necesita de un mínimo proceso de preparación del terreno y para ello se puede utilizar un taladro de 60 cm de diámetro. Es muy importante que durante el ahoyado quede el terreno bien preparado (ver ilustración 1.4), la tierra debe encontrarse finamente desagregada y presentar un excelente grado de capilaridad, así el agua podrá llegar fácilmente desde la mecha hasta las raíces de la planta por capilaridad. En todos los casos la vegetación preexistente se mantendrá y, con el tiempo, tan pronto como las raíces hayan desarrollado su propio sistema capilar el Waterboxx se podrá retirar (normalmente uno o dos años después de su plantación) pudiéndose reutilizar en otra planta.



Ilustración 1.4. Waterboxx colocado en el terreno

Este aparato está especialmente diseñado para plantaciones en lugares de difícil orografía y clima hostil, ya que permite que los árboles sobrevivan a pesar de las dificultades del hábitat. El sistema no precisa agua subterránea ni electricidad, además estabiliza la temperatura alrededor del cuello de la raíz y dificulta que las malas hierbas crezcan cerca del árbol plantado, evitando también que los animales puedan dañar o destruir la planta. Además se ha comprobado que la masa de agua, situada entre las dos capas plásticas aislantes del waterboxx, atenúa los cambios bruscos de temperatura proporcionando a la plántula un medio más estable para su crecimiento y desarrollo (ilustración 1.5). Se han registrado diferencias puntuales de hasta 8,5° en las mínimas y de 18° en las máximas. Este efecto termoaislante beneficia a la planta ayudándola a superar el estrés térmico tras su trasplante (Marcos et al., 2013).



Ilustración 1.5. Esquema de un Waterboxx. Fuente: Groasis. Pieter Hoff. 2011.

Existen actualmente cinco tipos de Waterboxx, tres de plástico en producción y dos prototipos de cartón (ilustración 1.6).

1. **250WB Standard:** Waterboxx de polipropileno de color verde, sin adición de la sustancia *Ecopure*.
2. **240WB Bio 0,8:** Waterboxx de polipropileno de color amarillo-crema, con la adición de 0,8% de la sustancia *Ecopure*.
3. **210WB Bio 1,2:** Waterboxx de polipropileno de color amarillo con adición de 1,2% de *Ecopure*.
4. **Prototipo en cartón 1:** redondo y de color blanco, reciclable 100%. Actualmente en pruebas en una parcela.
5. **Prototipo en cartón 2:** cuadrado y de color blanco, reciclable al 100%. En esta investigación, no se ha llegado a probar.



Ilustración 1.6. Diferentes tipos de Waterboxx 1. 250WB; 2. 240WB; 3. 210WB; 4. Prototipo1; 5. Prototipo2

El primero no es biodegradable, los dos siguientes son parcialmente biodegradables por adición de la sustancia denominada *Ecopure* (©Bio-Tec Environmental LLC, <http://www.goecopure.com/>) que es una mezcla patentada de ingredientes orgánicos, especialmente formulada para aumentar sustancialmente la tasa de biodegradación de plásticos sin destruir sus propiedades (ilustración 1.7). El último de ellos es un prototipo en celulosa totalmente reciclable.

Durante la vida del proyecto se han utilizado cuatro tipos de envases (todos excepto el número 5). Los Waterboxx de cartón son unos prototipos totalmente reciclables, hechos de pasta de celulosa y que nacen de la necesidad de buscar nuevas fórmulas más respetuosas con el medio ambiente a un coste mínimo.



Ilustración 1.7. Estado de la degradación del Waterboxx tipo 210WB (Nº3) trascurridos cinco años

1.2.2. Resultados del proyecto

Durante la vida del proyecto, un equipo multidisciplinar formado por investigadores de la Universidad de Valladolid y de la Universidad de Santiago de Compostela se ha encargado de monitorizar el crecimiento de las plantas y comprobar la tasa de supervivencia de las especies. A falta del informe final, que está actualmente en proceso de redacción, se puede adelantar que en las plantaciones con Waterboxx, la supervivencia media ha superado el

73% en todas las zonas con una media de un 86%, frente a una media de un 45% de las plantas testigo. Estos exitosos resultados indican la validez de la tecnología en climas extremos y suelos muy degradados. Los resultados obtenidos en las primeras plantaciones, con ratios de supervivencia del 90% en Waterboxx frente a un 22% de los testigos, se presentaron en el Congreso Internacional IUFRO (*International Union of Forest Research Organizations*) en Estoril (Portugal) (Garrido, Hernández, Clérigo, Marcos, & Ortiz, 2012).

1.3. TÉCNICAS DE MUESTREO EN ESPECIES VEGETALES

En el sector agrario está muy extendido el control y monitorización de las especies cultivadas. Las plantas son seres vivos mejor o peor adaptados a nuestros suelos y dependientes de la meteorología puntual de cada zona y esta, cada año, suele variar. Normalmente estas técnicas de control se han venido realizando, mediante la utilización de diferentes métodos de muestreo que dependen de las necesidades del organismo encargado de realizarlo. Por ejemplo en el tema de la cuantificación de rendimientos de cosechas ha sido tanto el MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente) como AGROSEGURO (Agrupación Española de Entidades Aseguradoras de los Seguros Agrarios Combinados S.A.) los organismos que han estado más interesados en determinar las producciones de las cosechas con fines estadísticos o para el cálculo de las indemnizaciones de las cosechas aseguradas.

Tradicionalmente, las estimaciones de rendimientos en grandes extensiones se han venido realizando por el ministerio en base a métodos indirectos. Estos métodos obtenían la información a través de los técnicos de las Agencias de Extensión Comarcal de las Comunidades Autónomas en colaboración con las Asociaciones de Agricultores. Este sistema estadístico, aunque tenía graves inexactitudes, cumplía con su objetivo final, la elaboración de los Anuarios de Estadística Agraria.

A partir de 1990 se ha producido un cambio en la metodología, surgiendo la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE), que utiliza métodos estadísticos apoyándose en aforos a pie de campo de “segmentos” (microparcelas georreferenciadas de 700 x 700 metros) que se encuentran distribuidos aleatoriamente a lo largo del territorio nacional. Esta encuesta sirve de base, en la actualidad, para la incorporación de los datos a dichos anuarios.

También por métodos indirectos, se ha intentado estimar el rendimiento y evaluar la variabilidad productiva espacial en grandes superficies de cultivo de *Solanum tuberosum* (patata). Estos métodos calculan el rendimiento a través de la cobertura del follaje, la

fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada y la tasa de agua que transpira el cultivo (de la Casa, Ovando, Bressanini, Martínez, & Rodríguez, 2012).

En el ámbito forestal, la producción de bellota en la dehesa se puede estimar por métodos cualitativos o indirectos, que se basan en la meteorología del año y en indicadores estimativos de la floración y sanidad vegetal de las encinas y también por métodos cuantitativos o directos, apoyados por conteos visuales y trampas para captura de las bellotas (Rodríguez-Estévez, Martínez, Moreno, Muñoz, & Castro, 2008).

Pero en los métodos de control y monitorización el verdadero problema surge cuando se trata de cuantificar con precisión el aforo o una característica específica de una entidad más pequeña, por ejemplo de una parcela, de un pequeño grupo de plantas o de una planta sola. En este caso, el proceso necesita de un técnico que tase, es decir que evalúe mediante una visita a pie de campo, con procedimientos objetivos “in situ”, el dato relevante de la parcela. Este tipo de control tiene tres grandes inconvenientes: es lento, es caro y, a veces, no es infalible.

Según Mostacedo & Fredericksen (2000), existen diversos métodos de muestreo en el ámbito forestal. El más sencillo es el muestreo aleatorio simple donde, al disponer de poca información previa, se seleccionan las muestras aleatoriamente. Cuando se dispone de más información se puede realizar el muestreo aleatorio estratificado separando los grupos en clases más o menos homogéneas. El muestreo sistemático consiste en ubicar las muestras en un patrón regular a partir de un punto normalmente situado al azar. Los transectos son rectángulos situados de manera aleatoria y de tamaño variable y los cuadrantes consisten en situar al azar un cuadrado de tamaño conocido sobre la vegetación a evaluar, para determinar los parámetros más relevantes de ella y extrapolar los resultados a una zona más amplia.

En el proyecto LIFE+ “Los Desiertos Verdes”, la monitorización de las especies plantadas en Waterboxx para determinar el porcentaje de supervivencia frente a las testigos, se ha realizado a través de un muestreo sistemático tomando muestras de cada parcela a partir de un determinado punto situado al azar. Aunque es aconsejable que se tomen entre el 1 y el 2% de las plantas (Pearce & Turner, 1990), se tomaron “in situ” un 5 % y se georreferenciaron con GPS para determinar su evolución durante la vida del proyecto (Neumann & Landis, 1995).

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN
MEDIANTE PLATAFORMAS DE
ELEVACIÓN Y SENSORES
AEROPORTADOS



2.1. PLATAFORMAS DE ELEVACIÓN DE SENSORES Y CÁMARAS

Desde la primera fotografía tomada en un avión en 1908, muchos han sido los intentos para la adquisición de imágenes desde el aire (Verhoeven, 2009). Aeronaves tripuladas como aviones, aviones ultraligeros, paramotores, autogiros, planeadores (éstos pueden llevar motor opcionalmente) y helicópteros han sido utilizados en ensayos para la adquisición de imágenes (Skaloud, Vallet, Keller, Veyssiere, & Kölbl, 2001; Vallet & Skaloud, 2004; Vallet, 2007).

Pero para elevar sensores no es necesario contar con tripulación. Muchos investigadores han utilizado todo tipo de ingenios de menor coste económico y con muy buenos resultados para sus fines. Unos funcionan con motor pero otros no necesitan tenerlo.

En arqueología se han utilizado mástiles o pértigas como lo muestra el trabajo de Ortiz, Gil, Martínez, Rego, & Meijide (2013). Esta tecnología permite que la cámara quede situada de manera estacionaria sobre el objeto a fotografiar, obteniendo muy buenos resultados en cuanto a la calidad de las imágenes tomadas. Para la monitorización, tanto por teledetección como por fotogrametría, es imprescindible que la cámara no sufra vibraciones que provoquen fotografías trepidadas; sin embargo, es muy corriente que en determinadas situaciones y con determinados sistemas, las imágenes aparezcan movidas y/o desenfocadas lo que arruinaría su utilización posterior a causa de la elevada velocidad de los sistemas portantes. Las pértigas son muy estables, económicas, de fácil portabilidad y muy adecuadas, tanto para investigaciones en gestión patrimonial como para la confección de modelos tridimensionales (Ortiz, Gil, Martínez, Rego, & Meijide, 2010; Martínez, Ortiz, & Gil, 2015). Su mayor inconveniente es su limitación en altura (20 metros máximo) (Verhoeven, Loenders, Vermeulen, & Docter, 2009).

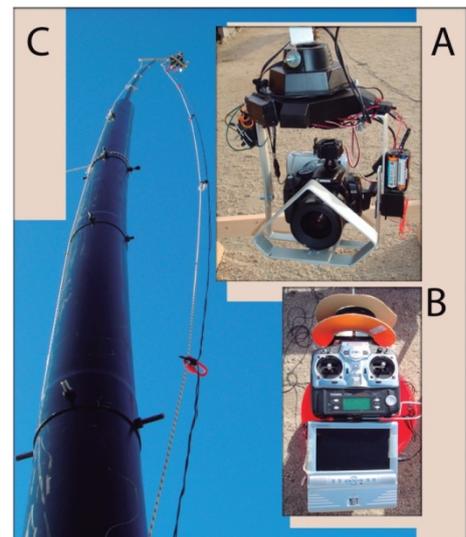


Ilustración 2.1. A) Cámara con soporte; B) Emisora de radio control; C) Sistema de pértiga o mástil. Fuente: Ortiz et al., 2013

Además de las pértigas se pueden utilizar cometas para elevar cámaras a baja altitud (J. S. Aber, Aber, & Pavri, 2002; Bogacki, Malkowski, & Misiewicz, 2008; Smith, Chandler, & Rose, 2009). Éstas se utilizan también por los equipos de arqueología desde hace décadas y son también muy económicas. Sus puntos débiles son su escasa capacidad de elevación

(soportan pocos kilogramos de carga de pago) y su necesidad de viento continuo, regular y no demasiado fuerte (Verhoeven, 2008).

Otros autores han realizado ensayos con globos (Boike & Yoshikawa, 2003; Kemper, Celikoyan, Altan, & Toz, 2003; Altan, Celikoyan, Kemper, & Toz, 2004). Estos aparatos auto-sustentados, se pueden utilizar en situaciones de escaso viento, aprovechando para volar que el aire que contienen es más ligero en el interior que en el exterior de las paredes del globo. Esta técnica está condicionada por la velocidad del viento y puede impedir su gobierno incluso en situaciones de vientos flojos (alrededor de 15 km/h). Las principales ventajas que tienen, tanto los globos como las cometas, es que pueden flotar sobre un determinado lugar siendo estables y libres de vibraciones (Klemas, 2015).

Incluso se han entremezclado diferentes sistemas utilizándose hasta dos plataformas distintas en el mismo ensayo (James S. Aber, 2004; Bauman, Parker, Goren, Freund, & Reeder, 2005; Wolf, 2006) y se han desarrollado sistemas intermedios, como el Helikite, un híbrido entre globo y cometa, con las ventajas de ambos (Verhoeven, Loenders, Vermeulen, & Docter, 2009).

También se han utilizado dirigibles (Pitt, Glover, & Jones, 1996; Inoue, Morinaga, & Tomita, 2000; Ries & Marzloff, 2003) que vuelan, mediante helio o aire caliente, en un rango de altitudes de 30 a 400 metros. Estos vehículos, gracias a un pequeño motor, pueden alcanzar velocidades máximas de 40 km/h, siendo capaces de obtener imágenes de alta calidad. No obstante, el elevado coste de estas aeronaves y su larga preparación, previa al vuelo, hace que actualmente sean poco utilizadas.

En los últimos años se ha producido un importante desarrollo de pequeñas plataformas de vuelo no tripuladas a motor, donde el piloto opera desde fuera de la aeronave. Esto implica ciertas ventajas: son muy operativas, es decir que pueden aterrizar y despegar sin necesidad de pistas especiales, su menor tamaño se traduce en una drástica reducción de costes (Klemas, 2015), son ideales para realizar fotografías a baja altura, adquirir imágenes a gran escala y para la fotogrametría de rango cercano (Verhoeven, 2009) y, al no estar tripuladas, en caso de accidente la vida humana no corre peligro (Eisenbeiß, 2009).

Por el contrario estas aeronaves tienen limitaciones importantes en cuanto a autonomía, capacidad de carga y capacidad de vuelo ante condiciones meteorológicas adversas, viento y lluvia fundamentalmente. Entre sus principales inconvenientes destacan los problemas de vibraciones inducidas, la técnica operativa a veces complicada, su altura de operación

restringida y el coste económico derivado de las operaciones de mantenimiento y reparación de averías (Verhoeven et al., 2009).

Diversos investigadores han comprobado la eficacia de este tipo de aeronaves y han realizado ensayos con mini-helicópteros (Wendel, Meister, Schlaile, & Trommer, 2006; Eisenbeiß, 2009); con paramotores no tripulados (Lejot et al., 2007) y con otro tipo de vehículos aéreos no tripulados (Everaerts, Lewyckyj, & Fransaer, 2004; Sauerbier & Eisenbeiss, 2010; Chiabrande, Nex, Piatti & Rinaudo, 2011; Hendrickx et al., 2011).

2.2. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

2.2.1. Definición

La ICAO (*International Civil Aviation Organization*) reconoce en su circular 328 (2011) que existen muchas categorías de aeronaves: globos, planeadores, aviones, multirrotores... y establece en su marco normativo que un vehículo aéreo no tripulado es una aeronave que vuela sin un piloto al mando a bordo y que se controla a distancia y plenamente desde otro lugar y de forma autónoma.

Según dicha organización, todos los UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), ya sean pilotados a distancia, plenamente autónomos o combinación de ambos, están sujetos a las disposiciones del Artículo 8 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional de 1944 (también conocido como Convenio de Chicago) que estipula que toda aeronave capaz de volar sin piloto deberá contar con la autorización especial del Estado.

Por lo tanto, el término UAV es un término amplio y genérico que engloba a todas las aeronaves no tripuladas, sin embargo RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) está más acotado. Un RPA está controlado en todo momento por un piloto remoto, que necesita licencia y se encuentra ubicado fuera de la aeronave. Es quien la monitorea, se comunica con ella mediante un enlace de voz o datos y tiene responsabilidad directa de su conducción segura durante todo su vuelo. Este término, como vemos, implica la presencia de piloto convenientemente formado, por eso preferimos adoptar en esta Tesis Doctoral el término de RPA que además, en el uso común civil, es el término más utilizado. Por lo tanto, existe un espacio entre unas (UAVS) y otras (RPAS) que lo ocupan las aeronaves no tripuladas que vuelan plenamente de forma autónoma, es decir sin piloto.

La ICAO reconoce también que la demanda de pequeños RPAS civiles que vuelen por visibilidad directa visual (VLOS) (*Visual Line Of Sight*) para cualquier tipo de actividad civil

continuará creciendo y que quizá, en un futuro próximo, las aeronaves pilotadas a distancia puedan integrarse al sistema de aviación civil internacional.

Además, esta organización también especifica la preferencia de considerar el sistema completo: aeronave, estación de control en tierra y sistema de comunicaciones, distinguiendo por una parte el vehículo propiamente dicho (UA o RPA) del sistema completo (UAS o RPAS). Según Austin (2011) el más exigente requisito para el sistema de comunicaciones de un UAV es proporcionar, a través de un sistema de radio frecuencia o cualquier otro sistema en el futuro, enlaces de datos seguros entre la estación de tierra y la aeronave. Es tan importante que sin estos componentes sería imposible volar.

2.2.2. Origen y desarrollo

Parece ser que el origen de las aeronaves no tripuladas se remonta a 1916. En este año, los estadounidenses Lawrence y Elmer Sperry desarrollaron un giroscopio, a modo de autopiloto, que estabilizaba el fuselaje y lo aplicaron a un avión sin piloto que voló con éxito una distancia superior a 30 millas (Nonami, 2007).

El mismo autor explica que durante la Primera y, sobre todo, la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron diferentes prototipos de aviones no tripulados que hacían labores de reconocimiento e incluso servían como blanco aéreo radio-controlado. Los ingleses los llamaban *drones*, sustantivo que significa literalmente zángano, por el ruido que hacían sus motores y que se asemejaban al que producen al volar estos insectos. También la estabilidad en el vuelo de los multirrotores puede sugerir el vuelo de los abejorros. Como dato significativo la RAE (Real Academia Española) en la 23ª edición del Diccionario Académico de la Lengua Española (2015) aceptó este vocablo como adaptación al español de la palabra inglesa al referirse a las aeronaves no tripuladas.

Las investigaciones sobre estos aparatos prosiguieron su curso durante la Guerra de Vietnam y la Guerra fría, pero es en la década de los 90, con la Guerra del Golfo Pérsico, cuando la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e Israel avanzaron en la vertiginosamente en la tecnología de alto vuelo (por encima de los 30000 m). En esos años aparece el acrónimo UAV, frente al término RPA más utilizado en nuestros días.

La tecnología desarrollada en este siglo está consiguiendo avances muy importantes con respecto a la automatización, el empleo de nuevos materiales, la miniaturización, la fiabilidad y la inteligencia artificial. Los modelos evolucionan rápidamente y los puntos

débiles se van poco a poco corrigiendo de manera que los RPAS están incrementando en los últimos años su popularidad ante la sociedad civil.

2.2.3. Clasificación

Chiabrando, Nex, Piatti & Rinaudo (2011) sostienen que una de las clasificaciones más utilizadas para las aeronaves no tripuladas ha sido la realizada por la Asociación Internacional de Sistemas de Vehículos no Tripulados (*Association for Unmanned Vehicle Systems International*, 2008) AUVSI.

De acuerdo con esta clasificación, existen tres principales categorías según sus posibles usos: objetivos tácticos, estratégicos y de uso especial. Cada tipología se divide en subcategorías, de acuerdo a unos parámetros preestablecidos: rango, altura, resistencia y peso. En el uso civil nos vamos a centrar en la primera de ellas: objetivos tácticos (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Clasificación de los UAVS tácticos. Traducida de Chiabrando, F. et al., 2011.

Subcategorías de UAVS tácticos		Rango	Altura	Resistencia	Masa
		[Km]	ratio [m]	[horas]	[Kg]
Micro	Micro	<10	250	1	<5
Mini	Mini	<10	150-300	<2	150
Rango cercano	CR	10-30	3000	2-4	150
Corto alcance	SR	30-70	3000	3-6	200
Medio Alcance	MR	70-200	5000	6-10	1250
Medio Alcance Resistencia	MRE	>500	8000	10-18	1250
Baja Altitud Penetración Profunda	LADP	>250	50-9000	0.5-1	350
Baja Altitud Larga Resistencia	LALE	>500	3000	>24	<30
Media Altitud Larga Resistencia	MALE	>500	14000	24-48	1500

Las clasificadas como subcategorías, micro y mini-UAV, se emplean generalmente para fines fotogramétricos y de teledetección ya que son plataformas más baratas de construir que las tradicionales tripuladas (Chiabrando et al., 2011).

Con el paso de los años, la miniaturización de los componentes ha hecho que algunas plataformas sean tan pequeñas que quepan incluso en la mano. Estos nuevos prototipos tendrían la consideración de nano-UAV.

Watts, Ambrosia & Hinkley (2012) clasifican las aeronaves no tripuladas empleadas en teledetección e investigación científica en siete categorías:

- **MAV - NAV (*Micro - Nano Air Vehicles*):** elevada portabilidad, baja altitud (inferior a 330 metros) y escasa autonomía (entre 5 y 30 minutos).
- **VTOL (*Vertical Take-Off & Landing*):** baja altitud y alta potencia. Despegue en vertical sin necesidad de pista. Escasa autonomía, la mayor parte utiliza baterías recargables de polímero de litio (Li-Po) que limitan la duración de vuelo a menos de una hora. Se utilizan en entornos de actuación rápida, por ejemplo en entornos agrícolas y urbanos. Su capacidad de carga no suele superar los 2 kg de peso y tiene limitadas tanto la altura como la distancia de vuelo. Los VTOL suelen ser multirrotores (también llamados multicópteros) que normalmente tienen entre 4 y 8 motores y mini helicópteros con motor de combustión, mayor autonomía y carga de pago.
- **LASE (*Low Altitude, Short Endurance*):** aeronaves optimizadas para facilitar el despegue y aterrizaje en campo. La mayor parte se lanzan a mano y aterrizan con el fuselaje. La envergadura es inferior a 3 metros y el peso gira en torno a los 2.5 kg. La carga útil suele ser muy reducida y la autonomía varía entre 45 minutos y 2 horas. A esta categoría suelen pertenecer los aviones de ala fija de uno o dos motores.
- **LALE (*Low Altitude, Long Endurance*):** cargas útiles de varios kg a una altura de unos pocos miles de metros durante períodos prolongados.
- **MALE (*Medium Altitude, Long Endurance*):** aviones de mayor tamaño que las clases anteriores, que operan a altitudes de hasta 9000 metros en vuelos complejos que se pueden separar hasta varios cientos de kilómetros de sus estaciones terrestres y que duran muchas horas.
- **HALE (*High Altitude, Long Endurance*):** Estos son la mayor y más compleja clase de UAS. Pueden volar a altitudes superiores a 20000 metros o más en las misiones que se extienden miles de kilómetros con duraciones de vuelo de más de 30 horas.

Otra modo de clasificación sería en función de la forma de obtener la sustentación, identificándose tres subcategorías:

- **Plataformas auto-sustentadas:** bajo esta subcategoría se engloban globos, cometas y dirigibles. Son vehículos que se elevan debido a que pesan menos que el propio aire.
- **Plataformas de ala fija:** están fabricadas con elementos aerodinámicos simples y tienen la ventaja de ser capaces de alcanzar velocidades elevadas manteniendo una

buena autonomía, lo que les hace más eficientes para su uso en cartografía y teledetección. Su talón de Aquiles es la carga de peso que limita la calidad de las cámaras que pueden portar. Este tipo de aeronaves no necesitan una pista o lanzador para el despegue y aterrizaje.

Aunque no es muy frecuente, están apareciendo sistemas híbridos VTOL. Es el caso de las plataformas *Tail-sitters* y *Tilt-rotors*. En las primeras el avión descansa sobre su cola apuntando verticalmente hacia arriba. Después de la fase de despegue, la aeronave se inclina hacia delante para realizar el vuelo de manera normal. Para el aterrizaje se vuelve a disponer en posición vertical. En el caso de las *Tilt-rotors*, después de realizar el despegue en vertical, el rotor se balancea hacia delante para actuar como propulsor. Cuando va a aterrizar vuelve a girar a la posición inicial de despegue.

- **Plataformas de ala rotatoria:** son de fabricación más compleja pues llevan varios motores y variadores que pueden alcanzar velocidades de vuelo alta pero con una autonomía baja. Presentan la ventaja de la posibilidad de efectuar vuelo estacionario y una gran maniobrabilidad y precisión. Su carga de peso es generalmente superior a las plataformas de ala fija. A esta clasificación pertenecen los multirrotores o multicópteros y los helicópteros.

2.2.4. Modos de operación

Atendiendo al documento publicado por la Comunidad de Madrid sobre los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil, existen cuatro modos de operación, si bien pueden surgir modos intermedios (Comunidad de Madrid, 2015). Estos modos de operación son:

- **Modo manual:** el piloto toma el mando de la aeronave y con la emisora efectúa las operaciones correspondientes que se transmiten desde la estación de tierra. De esta manera se puede variar la potencia de los motores y modificar los servos para controlar la altura y los giros de la aeronave.
- **Modo asistido:** similar al anterior pero el piloto indica las órdenes y el autopiloto las ejecuta.
- **Modo semiautónomo o automático:** una vez establecido el plan de vuelo con el programa de planificación y enviados los *waypoints* al autopiloto, la aeronave despegue con ayuda del piloto y realiza de forma automática el vuelo sin más intervenciones hasta el momento del aterrizaje, momento en el que el piloto toma

nuevamente el mando. En caso de necesidad por una avería surgida, el piloto puede intervenir con la emisora y realizar una intervención rápida o una vuelta a casa.

- **Modo autónomo:** en todo momento la aeronave realiza el vuelo programado pero existe la posibilidad de ordenar al autopiloto que modifique el plan de vuelo previsto para realizar una operación concreta y no programada con antelación. Es un modo asistido, porque es el autopiloto el que realiza la operación que le indica el operador desde la estación de tierra.

2.3. CÁMARAS MULTIESPECTRALES

La cámara multiespectral constituye el elemento primordial para la recogida de los datos y su posterior análisis mediante tratamientos digitales.

Los sensores remotos empleados en la detección de la cubierta vegetal son de tipo activo y pasivo (Moorthy et al., 2011). Los de tipo activo emiten energía para escanear volúmenes y son capaces de medir la radiación reflejada del objetivo, mientras que los pasivos detectan simplemente la radiación emitida o reflejada, sin necesitar para ello la emisión de ningún pulso. Entre las ventajas de la estimación de biomasa mediante sensores nos encontramos la posibilidad de obtener mediciones de cada lugar en el bosque, la velocidad con la que los datos pueden ser recogidos y procesados, el relativamente bajo costo de muchos de estos sensores, y la capacidad de recopilar datos en áreas de difícil acceso desde el suelo (Bortolot & Wynne, 2005).

Para la estimación de biomasa, se han utilizado con éxito sensores remotos de tipo activo: sistemas radar activos (Wu, 1987; Le Toan, Beaudoin, Riom, & Guyon, 1992); sensores LIDAR (*Light Detection And Ranging*) aeroportados (Naesset, 1997; Lim & Treitz, 2004; Rao et al., 2014); laser escaner (Lee, Ehsani, & Schueller, 2007; Jaakkola et al., 2010; Raunonen et al., 2013) y sensores de ultrasonidos (Bhardwaj, Warbhe, & Kumar, 2015). También sistemas ópticos pasivos de alta y media resolución (Meeuwig & Miller, 1979; M. A. Lefsky, Cohen, & Spies, 2001; Solberg et al., 2009).

Los sistemas basados en teledetección pasivos dependen de la variabilidad de las respuestas espectrales de la vegetación en las regiones del visible e infrarrojo cercano. Para determinar la utilidad potencial de las imágenes de baja altitud y amplia escala en la evaluación de biomasa vegetal en arbustos, Quilter & Anderson (2001) hicieron un estudio, en sensores de tipo pasivo, en el que se correlacionaron los datos de reflectancia de las imágenes con los porcentajes de defoliación de los arbustos. También se ha estudiado la

biomasa en cultivos de maíz, alfalfa y soja y su grado de correlación con la fertilización nitrogenada (Hunt Jr, Cavigelli, Daughtry, McMurtrey III, & Walthall, 2005). Los métodos basados en sensores remotos con RPAS pueden ser integrados con evaluaciones sobre el terreno para producir la información necesaria para estimar la biomasa y el carbono de los bosques en un amplio rango de escalas (Zahawi et al., 2015).

Este tipo de sensores (pasivos) proporcionan mediciones detalladas de la distribución horizontal del dosel de copas mientras que los sistemas LIDAR (activos) son capaces de ofrecer información precisa en ambas dimensiones, horizontal y vertical. Usando datos LIDAR en superficies extensas de pinares poco espesas es posible estimar la altura del dosel y la densidad de pies con una exactitud aceptable (Montalvo Rodríguez et al., 2013). La capacidad de estos sensores activos de medir directamente la estructura vegetal, ha supuesto un gran avance en el inventario remoto de los recursos forestales. Es por ello que se ha convertido en una de las opciones más interesantes para la tele-observación de la biomasa aérea y en la realización de modelos digitales de copas por diferencia entre modelos digitales de elevación y modelos digitales de superficie (González-Jaramillo et al., 2013).

Para poder volar en una aeronave no tripulada de tamaño micro, necesitamos un tipo de sensor que sea muy ligero (Nebiker, Annen, Scherrer, & Oesch, 2008). La evolución tecnológica está consiguiendo que los sensores que portan sean cada vez más ligeros y de mayor resolución. Actualmente se pueden obtener imágenes de alta resolución que permiten incluso la observación de plantas individuales (Xiang & Tian, 2011).

2.4. TRATAMIENTOS DIGITALES

La vegetación es el principal objetivo de la teledetección y las hojas son los componentes de la vegetación más representativos, puesto que constituyen la mayor parte de la superficie de la planta expuesta a la radiación solar. De toda la radiación solar que reciben, tanto luz directa como luz difusa, reflejan o transmiten sólo ciertas longitudes de onda. Habitualmente en las técnicas de teledetección se utilizan sensores que captan la luz reflejada, porque captar la radiación transmitida a través de las hojas requiere de mayor complejidad y equipos más costosos. No obstante, la luz reflejada es una medida indirecta de la radiación absorbida (Valero Ubierna et al., 2010).

El vocablo teledetección proviene del término inglés *“remote sensing”* que quiere expresar la adquisición de datos sin contacto con el objeto observado. Se realiza a través de sensores localizados en plataformas móviles que registran radiación radiométrica (Sobrino, 2000).

Según Pinter Jr et al. (2003), las plantas con elevado vigor vegetal van a mostrar muy baja reflectancia y transmitancia en las regiones visibles del espectro (es decir, entre los 400 y 700 nm). Por el contrario, va a ser elevada en las regiones del infrarrojo cercano (entre 700 y 1300 nm). Además, según estos autores, los índices de vegetación han servido de base para la determinación del vigor vegetal y para muchas otras aplicaciones de la teledetección puesto que existe una alta correlación con la biomasa y la hoja verde.

Kurz (2003) fue capaz de estimar parámetros de vegetación en diferentes campos de ensayo de trigo de invierno, a partir de las imágenes obtenidas con un escáner multiespectral y los datos reales recogidos sobre el terreno, mostrando cuatro parámetros: índice de área foliar, contenido de clorofila, materia seca, y contenido de agua, de manera precisa y muy fiable.

Rodríguez Pérez, Miranda, & Álvarez (2013) hicieron un estudio para contribuir a la mejora de los registros vitícolas presentando una metodología para el mapeo de viñedo basado en sistemas de teledetección por satélite, cuantificando la influencia de diferentes factores que afectan a la precisión global de clasificación: método de muestreo, uso de mosaicos georreferenciados, o la combinación de las dos imágenes digitales.

La mayoría de los procedimientos para la estimación de propiedades de las plantas mediante sensores remotos pasivos hacen uso de las diferencias de la reflectancia entre las longitudes de onda visibles e IRc, utilizándose Índices de vegetación calculados como relaciones o combinaciones lineales de luz reflejada en las bandas de onda visible (RGB) e IRc (Nebiker et al., 2008). El empleo de estos índices matemáticos también es tratado por Peña-Barragán et al. (2008).

Los dos índices más característicos son el RVI (*Ratio Vegetation Index*) y el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). El RVI se obtiene como cociente de las reflectancias de la banda infrarroja cercana y la banda roja, es decir IRc/R (Valero Ubierna et al., 2010). El NDVI (Tucker, 1979) se basa en que la vegetación sana absorbe la mayor parte de la luz visible RGB (sobre todo en la banda (R) roja) que le llega, y refleja una gran parte de la luz del infrarrojo cercano (IRc). Sin embargo, la vegetación enferma o rala refleja más luz visible y menos luz en el infrarrojo cercano. Este hecho permite determinar con claridad el contraste entre suelo desnudo y planta verde, proporcionando unos valores cuantitativos para el seguimiento de la biomasa o índice del área foliar verde. Esta marcada diferencia va a ser la clave para el seguimiento y control de las especies vegetales y en el estudio de los ecosistemas agrarios que nos ayuden a encontrar las estrategias de gestión

para maximizar la producción en los cultivos y reducir al mínimo los impactos ambientales (Dorigo et al., 2007) y para cuantificar las áreas agrícolas utilizando algoritmos de clasificación experta (Sebem, González, García, de la Vega, & Valverde, 2005). Este índice ha sido empíricamente correlacionado con parámetros estructurales (Morsdorf et al., 2004; Jonckheere, Nackaerts, Muys, van Aardt, & Coppin, 2006; Morsdorf, Kötz, Meier, Itten, & Allgöwer, 2006), como el LAI (*Leaf Area Index*, Índice de Área Foliar) del dosel de copas.

Primicerio et al. (2012), tras el análisis de las imágenes tratadas adquiridas mediante el vuelo en un viñedo con una aeronave no tripulada y una cámara multiespectral confeccionaron mapas de vigor a través del NDVI obteniendo datos precisos que mostraron claramente las condiciones de heterogeneidad en el cultivo.

Gago et al. (2015) han combinado diferentes tipos de vehículos aéreos no tripulados con diferentes sensores remotos para obtener imágenes digitales en cultivos. Posteriormente, comparando los resultados con los datos de realidad terreno han obtenido correlaciones positivas en varios índices de reflectancia, como NDVI, TCARI / OSAVI (*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*) y PRI_{norm} (*Photochemical Reflectance Index*).

Además, otros autores han utilizado también NDVI en sus investigaciones: en cultivos herbáceos (Torres-Sánchez, López-Granados, & Peña, 2015); en viñedo (Microbes, 2015a); en girasol (López-Granados et al., 2015); en olivo (Díaz-Varela, de la Rosa, León, & Zarco-Tejada, 2015); en la encina (Lehmann, Nieberding, Prinz, & Knoth, 2015) e incluso se han efectuado investigaciones en la detección de árboles individuales (Michez et al., 2013).

Según Peña-Barragán et al. (2008) otros índices también han servido para estudiar aspectos de la vegetación, el RVI (Índice de Relación de la Vegetación) (Jordan, 1969); el BAI (Índice de Área quemada) que puede ayudar en la discriminación de los bosques y rastrojos quemados (E. Chuvieco, Martín, & Palacios, 2002); el SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index* o Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) que Huete (1988) utilizó para reducir al mínimo los efectos de fondo del suelo en la cuantificación de verdor en zonas áridas incorporando un factor de ajuste del suelo (L) al NDVI.

Zhang & Kovacs (2012) indican que los índices de vegetación se encuentran entre las herramientas más utilizadas en la teledetección agrícola y se refieren en particular a los índices NDVI, SAVI y Green NDVI (GNDVI o NDVI verde, *Green Normalized Difference Vegetative Index*) como los más recomendables.

Torres-Sánchez et al. (2015) han utilizado el índice GNDVI en el análisis de los cultivos de viñedos y tomates, sirviéndose de las imágenes obtenidas con una cámara Tetracam elevada mediante un RPA. Este índice según Gitelson & Merzlyak (1997) es mucho más sensible a la concentración de clorofila que el NDVI.

Potosme (2008) realiza un repaso exhaustivo acerca de la implementación de las técnicas de Análisis de Componentes Principales (ACP) en las ciencias ambientales haciendo hincapié en la trascendencia que esta técnica tiene en la ecología como método estadístico de simplificación de un conjunto de datos con numerosas variables.

Gil et al. (2013) explicaron que el ACP consiste en convertir un conjunto de bandas con alto grado de correlación entre ellas en otro conjunto de bandas diferentes totalmente incorreladas y que la ventaja de la utilización de este análisis radica en que la mayor parte de la información recae en las tres primeras bandas lo cual permite una reducción drástica del número de canales. Esta transformación también se ha utilizado por otros autores para la confección de mapas temáticos a partir de imágenes multiespectrales de satélite. La finalidad, en este caso, era la evaluación del rebrote de la vegetación, tras un incendio, evitando la confusión de clases de firmas espectrales (Richards, 1984).

Finalmente, se recomienda que para facilitar el análisis visual de masas vegetales se recurra a técnicas de pseudo-color o a las composiciones coloreadas. La más habitual es el denominado falso color en la que se aplican las bandas RGB sobre las bandas correspondientes al IRc, R y G respectivamente. También son interesantes las técnicas de filtraje de paso alto que enfatizan los rasgos lineales de la vegetación (Chuvieco, 1990; 2002).

2.5. EL USO COMBINADO DE LOS RPAS Y SENSORES Y SUS APLICACIONES

2.5.1. Aplicaciones en el ámbito de la ingeniería

Tradicionalmente, los satélites han ofrecido cobertura para monitorizar grandes superficies mediante imágenes digitales multiespectrales. Su resolución temporal, aunque no era la más idónea, podía considerarse de utilidad para ser aprovechada en el ámbito de estudios de ingeniería de temática medio ambiental. Con el paso de los años, aunque esas imágenes van ofreciendo datos de resolución espacial cada vez más elevados, todavía son necesarias imágenes tomadas de una forma menos rígida (Klemas, 2015). Métodos para la discriminación de diferentes cultivos de regadío mediante imágenes espectrales de satélite

han sido ensayados en Castilla y León con buenos resultados (Cachorro, Berjón, Guerrero, & Cid, 2001)

El uso combinado de RPAS y sensores aeroportados puede ser una forma más acertada para este tipo de actuaciones. Su capacidad de obtención de imágenes de elevada resolución espacial a las que se puede integrar la información de la posición GPS, su adecuada flexibilidad a la hora de la planificación y realización de los vuelos y su relativo bajo presupuesto, los convierten en los más idóneos para cartografía de pequeñas extensiones, fotogrametría y otras disciplinas ligadas a la ingeniería del medio ambiente (Zhang & Kovacs, 2012).

Estas imágenes tomadas a baja altitud han demostrado ser una alternativa potencial en la vigilancia del medio ambiente, por su bajo costo, su alta resolución espacial y temporal y su alta flexibilidad en la adquisición. La navegación autónoma de un UAV se realiza mediante el piloto automático a través de su GPS, de las técnicas de medición inercial y de otros sensores (Grenzdörffer, Engel, & Teichert, 2008).

En este tipo de vehículos lo más habitual es el empleo de cámaras multispectrales, cámaras digitales (Herwitz et al., 2004a; Vogler, Eisenbeiss, Aulinger-Leipner, & Stamp, 2009) y cámaras térmicas (Sugiura, Noguchi, & Ishii, 2007; Gonzalez-Dugo et al., 2013).

Con sensores elevados mediante RPAS se han hecho investigaciones en el ámbito del seguimiento y control medioambiental: en la monitorización de incendios (Zhou, Li, & Cheng, 2005); en el mapeo de las especies invasoras (Hardin & Jackson, 2005); en la estimación de la biomasa vegetal (Quilter & Anderson, 2001) y de la biomasa y del nitrógeno (Hunt Jr et al., 2005); en el seguimiento y mapeo de los pastizales (Laliberte, Rango, & Herrick, 2007; Laliberte & Rango, 2009); en la determinación de la altura de la planta (Sharma et al., 2008; Jaakkola et al., 2010); en la medición de la temperatura de cubierta vegetal y detección del estrés hídrico de los cultivos (Berni, Zarco-Tejada, Suárez, & Fereres, 2009; Suárez et al., 2010); en la monitorización de los cambios en la vegetación (Slaughter, Laliberte, Rango, Maxwell, & Winters, 2008); en el control de avalanchas (Vallet & Skaloud, 2004); en las aguas costeras poco profundas (English et al., 2013) y en el seguimiento fitosanitario de masas forestales y labores de fumigación (Barrientos et al., 2007).

En el ámbito de la ingeniería agronómica: en la agricultura de precisión (Reidelstuerz, Link, Graeff, & Claupein, 2007; Suárez et al., 2010); en el seguimiento de la madurez del café, identificación de los problemas de riego por goteo y proliferación de malezas (Herwitz et al.,

2004b) y en el viñedo para creación de mapas de vigor vegetal de la uva (Primicerio et al., 2012).

En el ámbito de la cartografía y fotogrametría: realización de modelos tridimensionales (Püschel, Sauerbier, & Eisenbeiss, 2008); de vuelos virtuales (Nebiker, Christen, Eugster, Flückiger, & Stierli, 2007); de mapas temáticos del terreno (Kise, Zhang, & Más, 2005; Sugiura, Noguchi, & Ishii, 2005; Rovira-Más, Zhang, & Reid, 2008; Nex & Remondino, 2014; Siebert & Teizer, 2014; Ruzgienė, Berteška, Gečyte, Jakubauskienė, & Aksamitauskas, 2015) y en la georreferenciación de imágenes y mosaicos (Zhang & Kovacs, 2012).

En otros campos: en el ámbito de la gestión patrimonial y herencia cultural (Johnson, Meisner, & Johnson, 1990; Lambers et al., 2007; Kaimaris & Patias, 2014), en el control e inspección del tráfico (Kaaniche, Champion, Pégard, & Vasseur, 2005; Egbert & Beard, 2011); en la prospección y explotación de recursos mineros (Barnard, 2010) o de sus consecuencias (Lechner, Fletcher, Johansen, & Erskine, 2012); en el ámbito de la seguridad y control de las fronteras (Sun et al., 2011), en el mantenimiento e inspección de líneas eléctricas (Li, Liu, Hayward, Zhang, & Cai, 2008), en la monitorización y control de aerogeneradores (Cooperman & Martinez, 2015) y en la inspección visual de las grandes estructuras como puentes, chimeneas, torres, presas, centrales eléctricas industriales o edificios históricos (Hallermann & Morgenthal, 2013).

2.5.2. Aplicaciones en el estudio de la vegetación y de la biomasa

A pesar de que la tecnología LIDAR se postula como la más adecuada para la estimación de biomasa, el alto coste del hardware y de la ejecución de los vuelos por el elevado peso de los equipos, únicamente aconseja su aplicación en proyectos de gran envergadura. En proyectos con bajo presupuesto es preferible la utilización de la fotogrametría, como solución intermedia entre la teledetección (Lefsky, Cohen, Parker, & Harding, 2002) y los sensores activos. El mayor problema según estos autores es que los sensores sufren de saturación en la respuesta espectral de follaje denso, con alta biomasa. Al igual que la teledetección, la fotogrametría permite realizar mediciones detalladas de la distribución horizontal de la parte aérea de la planta (visible desde el aire) pero no permite extraer información de su estructura vertical. Por este motivo, para calcular la biomasa aérea es fundamental disponer de un Modelo de Elevación del Terreno (MDT).

La viabilidad de un nuevo sistema para determinar la altura y evaluar los cambios de la biomasa en árboles fue estudiada por Jaakkola et al. (2010). Estos investigadores desarrollaron un novedoso sistema de barrido de bajo coste que puede operar tanto a bordo

de un automóvil, como de un mini-helicóptero tripulado remotamente. Este sistema está compuesto de un sistema de posicionamiento GPS, un láser escáner Ibeo Lux y otros sensores utilizados para el mapeo. Utilizando un mini-UAV, se obtuvo una desviación estándar de 34 cm para la detección automática de altura de los árboles, con el sesgo correspondiente de 2 cm. Los resultados confirmaron la calidad y la precisión del láser montado en el mini-UAV.

Torres-Sánchez et al. (2015) han realizado un ensayo con una cámara Tetracam elevada por un Hexacóptero en cultivos de viñedo y tomate. Con los datos multiespectrales procesados se crearon ortoimágenes de las que se extrajeron el NDVI, el Green NDVI o GNDVI y el SAVI para examinar el vigor de la vegetación en cada cultivo. Las conclusiones resaltan el gran potencial del uso combinado de los RPAS y las imágenes digitales de alta resolución mediante el uso de técnicas fotogramétricas y que estas representan un recurso rápido, fiable y rentable para la evaluación de la salud de los cultivos.

En otro ensayo realizado por López-Granados et al. (2015) se comprobó el grado de infestación de malas hierbas en un cultivo de girasol mediante el análisis de imágenes aéreas solapadas recogidas por una cámaras visible y una multiespectral transportadas en un RPA a 30 y 60 m de altura. El resultado fue la obtención de orto-mosaicos en los que quedaban cartografiadas las plántulas de las malezas.

Microbes (2015b) comparó la respuesta espectral a través de diversos índices de vegetación: NDVI, GNDVI, GRVI (*Green-Red Vegetation Index*), SAVI y GSAVI (*Green Soil Adjusted Vegetation Index*) obtenidos con sensores elevados con RPAS a fin de identificar diferentes tratamientos de nitrógeno en un cultivo de maíz.

Díaz-Varela et al. (2015) crearon un modelo de superficie de las copas de olivos mediante orto-mosaicos generados a través de imágenes obtenidas desde el aire por medio de vehículos aéreos no tripulados y posteriormente un sistema de información geográfica para el análisis y clasificación de los árboles representados.

En el caso de la detección de los contenidos de nitrógeno y clorofila de las plantas, Sugiura, Noguchi, & Ishii (2005) utilizaron parámetros derivados del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y Green NDVI. El ensayo se realizó en dos parcelas, una de maíz y otra de remolacha azucarera, acoplado a un helicóptero pilotado remotamente un sensor de imagen (CCD), un sensor de dirección geomagnético (GDS), un sensor inercial (INS) y un sistema en tiempo real cinemático de posicionamiento global (RTK-GPS). A la cámara, con tres canales ópticos independientes y una resolución de 640x480 en 8

bits/píxel, se le instalaron unos filtros ópticos especiales que proporcionaron tres canales de video: verde (G), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRc). Las imágenes se tomaron cada 5 segundos, variando la altura desde 5.5 a 30 metros del suelo con una velocidad media del helicóptero de 0.6 m/s, obteniéndose imágenes de baja altitud que sirvieron para generar mapas de alta resolución de la situación de los cultivos.

2.5.3. Aplicaciones en la determinación individual del estado de salud de una planta

En el proceso de determinación para comprobar si una planta está viva o muerta se pueden utilizar datos tomados con sensores de alta resolución espacial, teniendo en cuenta que a menor tamaño de la planta o escaso vigor vegetal mayores serán las dificultades para su identificación.

El método más sencillo para aumentar la resolución espacial de un conjunto de datos espaciales es acercarse al sensor al objeto de interés (Smith et al., 2009), pero este hecho está reñido con la productividad. Aunque es difícil de predecir, sensores de alta resolución transportados en RPAS de última generación podrían capturar datos fiables con rendimientos y costes muy competitivos, frente a los métodos tradicionales.

Michez et al. (2013) estudiaron el estado de salud del aliso negro a través de una serie temporal de 16 imágenes (7 RGB y 9 IRc) obtenida con RPA y procesada con Agisoft PhotoScan. El estudio se realizó sobre 624 árboles localizados con precisión a través de los índices de vegetación NDVI y Green NDVI lográndose separar alisos negros sanos de otros con síntomas, con una Exactitud Global del 77%. En las conclusiones ponen de relieve el potencial de las ortofotos multitemporales tomadas con RPA para caracterizar especies de bosque de ribera y el estado de salud individual de cada árbol intentado mejorar la corrección radiométrica para alcanzar mayor tasa de precisión al reducirse la variabilidad causada por las condiciones de luminosidad.

Para estudiar la viabilidad del binomio multirrotor + cámara multispectral, Gil et al. (2013) realizaron un ensayo de campo con una doble finalidad: por un lado, determinar la altura del vuelo máxima a la que es posible discriminar las plantas vivas de las marras en Waterboxx y por otro, conocer cuáles son los tratamientos digitales más adecuados para su determinación. Es necesario establecer un compromiso entre la altura de vuelo y las necesidades de resolución y precisión (Smith et al., 2009) para poder evaluar parámetros individuales de cada planta. En plantas de pequeño porte y baja densidad de plantación, caso común en las repoblaciones forestales, son necesarios datos de alta resolución espacial. A menor altura, mayor es el volumen de datos (imágenes) y, por lo tanto, el trabajo

de gabinete también es mayor (procesado y análisis). Este es el motivo por el que necesitamos conocer hasta qué altura vamos a poder elevar nuestros sensores para encontrar el techo de vuelo óptimo que nos proporcione una huella de pixel correcta atendiendo a las necesidades de resolución y de precisión.

La cámara multiespectral utilizada en el ensayo (Tetracam Mini MCA-6 Digital) tiene sensores de tamaño reducido y baja resolución (1.3 megapíxeles por canal, hasta un total de 6 canales) que, en la práctica, limitan la detección de marras a una cierta distancia, en este caso, a la altura de vuelo adecuada. Cuanto mayor es la altura, mayor es el tamaño de cada píxel sobre el terreno y menor es el grupo de píxeles que definen cada plantón (Gil et al., 2013). Si el número de píxeles es muy reducido, el procesamiento digital de las imágenes no va a generar ningún resultado útil.

Después de analizar todos los datos obtenidos en los diferentes tratamientos, se concluyó que los mejores resultados se obtenían a una altura máxima de 13 metros para plantones jóvenes y con poco follaje, como puede ser el pino o la encina. Es necesario aclarar que, en muchos casos, la mayoría de estas plantas no sobresalía del Waterboxx y se decidió optar por reconocer las marras, dando por supuesto que las otras eran plantas vivas. En especies con más porte, como el abedul y sobre todo el castaño, esta altura pudo elevarse hasta los 22 metros, consiguiendo igualmente una correcta detección del vigor vegetal. El trabajo concluyó con índices de Exactitud Global (Nº de aciertos/ total) superiores al 89% en la determinación de marras en todas las especies. Como el porte y el vigor de las plantas vivas irán aumentando con el paso de los años, es de suponer que ese porcentaje lo haga también. El estudio también concluye que la aplicación de nuevas tecnologías (RPA con sensor aeroportado) y la utilización del método desarrollado suponen una alternativa válida para la captura de información de marras en la zona piloto evaluada en comparación con los métodos a pie de campo tradicionales. Este hecho será más evidente con el paso de los años cuando las plantas crezcan y no se necesite realizar un número demasiado elevado de fotografías en parcelas de gran tamaño.

Lin, Jiang, Yao, Zhang, & Lin (2015) han desarrollado un método para la detección individual de árboles en el medio urbano. Para ello, han implementado un algoritmo capaz de identificar los árboles sintetizando la textura y el color de la vegetación mediante el uso de imágenes oblicuas tomadas desde el aire con un RPA con errores en torno al 30%.

Lehmann et al. (2015) pudieron detectar plagas de insectos en encina a través de la defoliación presentada en las copas de los árboles. Para ello utilizaron imágenes de alta

resolución de infrarrojos, obtenidas con una cámara modificada para captar el IRc que fue elevada mediante un RPA. Dichas imágenes se organizaron en mosaicos y posteriormente se georreferenciaron y realzaron para obtener cinco clases diferentes referidas al estado de salud de los árboles, incluyendo las ramas sanas y muertas.

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS



3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral consiste en establecer una metodología, aplicable a parcelas de grandes dimensiones, para identificar de manera fiable, mediante sensores aeroportados con Vehículos Aéreos No Tripulados (RPAS), las plantas vivas y las muertas, en las especies plantadas con Waterboxx.

Pensamos que si fuese posible establecer una metodología para la detección de marras en Waterboxx, nos evitaría el desplazamiento durante varias jornadas para tomar datos reales de campo. Esto supondría abaratar los costes en mano de obra y ganar en seguridad, puesto que, por las características de los Waterboxx, estos se ubican en lugares de orografía complicada y/o climatología extrema.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El mencionado objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- Conocer la combinación sensor + aeronave + parcela como indicador para valorar la eficiencia del método empleado.
- Identificar la relación entre tipo de cámara, resolución del sensor, altura de vuelo y tamaño y vigor de la planta para obtener un elevado grado de Exactitud Global.
- Proponer el software que nos permita realizar los procesos previos de transformación de las imágenes, la obtención de ortofotos y ortomosaicos y los tratamientos digitales más adecuados para la identificación de las plantas vivas y muertas en los Waterboxx.

**P
A
R
T
E

I
I**

MATERIAL Y MÉTODOS

CAPÍTULO 4

MATERIAL



En este apartado se detallan los materiales empleados durante el proceso de investigación. Al ser un proceso de más de cuatro años, la tecnología empleada ha ido evolucionando en función de las necesidades surgidas en el desarrollo de la propia investigación. En este capítulo expondremos dichos materiales ordenados siguiendo un criterio cronológico.

Así, incluiremos en este capítulo la descripción de las zonas de estudio y de las especies analizadas, las aeronaves utilizadas en los vuelos, las cámaras y sensores empleados en la captura de los datos, el sistema de posicionamiento global utilizado para la toma de puntos de control necesarios en la georreferenciación y el software empleado durante el proceso y posterior tratamiento de las imágenes.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO Y DE LAS ESPECIES

4.1.1. Localización de las parcelas

Las parcelas objeto de nuestra investigación se encuentran ubicadas en una gran parte de las plantaciones con Waterboxx realizadas dentro del Proyecto LIFE+ “Los Desiertos Verdes”, proyecto cuyo objetivo es demostrar si el Waterboxx es una solución tecnológica capaz de aumentar la tasa de supervivencia en las repoblaciones forestales.

Para la selección de las parcelas se tomó como criterio que tuviesen características extremas que dificultasen la supervivencia de los plantones, en términos de clima y tipo de suelo. Con este criterio se seleccionaron lugares específicos, con suelos muy degradados y en algún caso de difícil acceso.

La ubicación de las parcelas es la siguiente:

- **León.** Estación de esquí de San Isidro (Puebla de Lillo). Zona de clima frío con precipitaciones elevadas y nieve hasta el verano. Suelo arenoso e inestable con gran cantidad de rocas.
- **Palencia.** Villarramiel (situada en el extrarradio de la población) y Finca Experimental de la ETS de Ingenierías Agrarias (Universidad de Valladolid) en el municipio de Soto de Cerrato. Zona de clima semiárido con precipitaciones escasas, sobre todo en verano. Suelos arcillosos y profundos.
- **Valladolid.** Escombreras pertenecientes a los Ayuntamientos de Fuensaldaña, Pedrajas de San Esteban y La Mudarra y parcelas de experimentación 1 y 2 de la Diputación de Valladolid en su Finca de Matallana (Villalba de los Alcores). Zona de

clima semiárido con precipitaciones escasas, sobre todo en los meses de verano. Suelos muy degradados y erosionados.

- **Zamora.** Parcela de experimentación perteneciente al Ayuntamiento de Sarracín de Aliste y escombrera de una cantera de pizarra en Riofrío de Aliste. Zona de clima semiárido de precipitaciones medias pero con déficit hídrico en verano. Suelos pedregosos y ácidos.
- **Zaragoza.** Parcela situada en los alrededores del Desierto de los Monegros y perteneciente al Ayuntamiento de San Mateo de Gállego. Zona de clima desértico con precipitaciones muy escasas. Vientos fuertes y secos. Suelos muy pobres y alcalinos.

La localización específica de cada una de las 11 parcelas monitorizadas en esta investigación está relacionada en el anejo 2, pero un mapa de la situación de las parcelas en conjunto se puede visualizar a continuación en la ilustración 4.1.

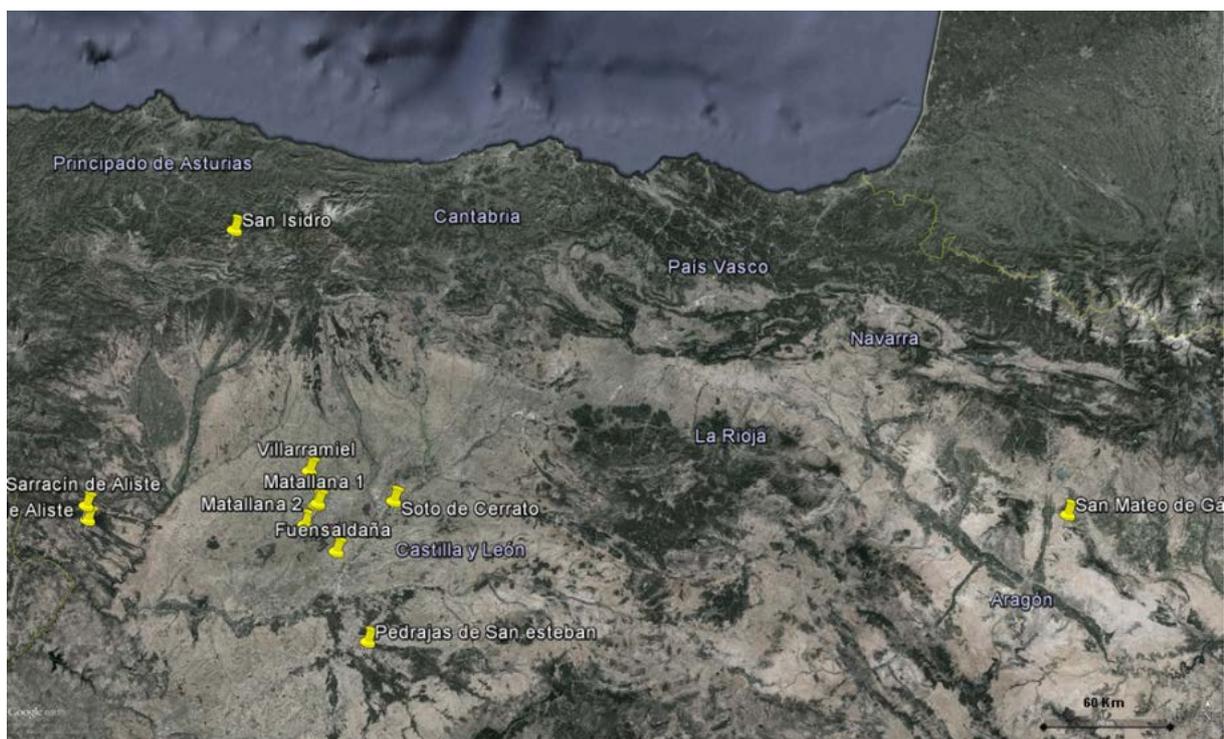


Ilustración 4.1. Localización de las parcelas objeto de esta investigación

4.1.2. Especies analizadas

Pasamos a presentar las especies que fueron analizadas organizadas en función de la ubicación de la parcela:

- **Villarramiel:** *Castanea sativa* (castaño), *Pinus pinaster* (pino), *Quercus Ilex* (encina), *Betula pendula* (abedul) y *Cupressus sempervirens* (ciprés).
- **San Mateo de Gállego:** *Robinia pseudoacacia* (falsa acacia) y *Pinus halepensis* (pino).
- **Soto de Cerrato:** *Castanea sativa* (castaño), *Sorbus aucuparia* (serbal), *Corylus avellana* (avellano), *Pistacia vera* (pistacho) y *Prunus dulcis* (almendro).
- **Sarracín de Aliste:** *Prunus avium* (cerezo) y *Juglans regia* (nogal).
- **Fuensaldaña:** *Pinus halepensis* (pino), *Quercus ilex* (encina) y *Rosa canina* (rosal).
- **Finca de Matallana 1:** *Quercus ilex x Tuber aestivum* (encina micorrizada con trufa blanca).
- **San Isidro:** *Betula pendula* (abedul), *Ilex aquifolium* (acebo), *Juniperus communis* (enebro) *Pinus sylvestris* (pino silvestre), *Pinus uncinata* (pino negro) y *Sorbus aucuparia* (serbal).
- **Riofrío de Aliste:** *Juniperus communis* (enebro).
- **Pedrajas de San Esteban:** *Retama sphaerocarpa* (retama), *Rosa canina* (rosal), *Quercus ilex* (encina) y *Salix fragilis* (sauce).
- **Finca de Matallana 2:** *Pinus halepensis* (pino) y *Quercus ilex* (encina).
- **La Mudarra:** *Pinus halepensis* (pino) y *Quercus ilex* (encina).

Las características específicas de cada una de las parcelas incluidas las especies plantadas en ellas aparecen determinadas en la tabla 4.1 en la que hemos incluido información sobre el año en el que se realizó el vuelo de recogida de los datos.

Tabla 4.1. Características de las parcelas voladas dispuestas en orden cronológico

Parcela	Término Municipal	Año de vuelo	Característica de la parcela	Propiedad	Especie
0	Experiencia previa	2011	Experimentación	Privada	<i>Castanea sativa</i> (castaño), <i>Pinus pinaster</i> (pino), <i>Quercus Ilex</i> (encina), <i>Betula pendula</i> (abedul) y <i>Cupressus sempervirens</i> (ciprés).
1	Villarramiel	2011	Extrarradio	Privada	<i>Castanea sativa</i> (castaño), <i>Pinus pinaster</i> (pino) y <i>Quercus Ilex</i> (encina)
2	San Mateo de Gállego	2012 y 2015	Desértica	Ayuntamiento	<i>Robinia pseudoacacia</i> (falsa acacia) y <i>Pinus halepensis</i> (pino)
3	Soto de Cerrato	2013 y 2014	Experimentación	Universidad de Valladolid	<i>Castanea sativa</i> (castaño), <i>Sorbus aucuparia</i> (serbal), <i>Corylus avellana</i> (avellano), <i>Pistacia vera</i> (pistacho) y <i>Prunus dulcis</i> (almendro)
4	Sarracín de Aliste	2013	Experimentación	Ayuntamiento	<i>Prunus avium</i> (cerezo) y <i>Juglans regia</i> (nogal)
5	Fuensaldaña	2013 y 2014	Restauración (escombrera)	Ayuntamiento	<i>Pinus halepensis</i> (pino), <i>Quercus ilex</i> (encina) y <i>Rosa canina</i> (rosal)
6	Matallana 1	2014	Experimentación	Diputación de Valladolid	<i>Quercus Ilex x Tuber Aestivum</i>
7	San Isidro	2015	Paisajístico (estación de esquí)	Diputación de León	<i>Betula pendula</i> (abedul), <i>Ilex aquifolium</i> (acebo), <i>Juniperus communis</i> (enebro) <i>Pinus sylvestris</i> (pino silvestre), <i>Pinus uncinata</i> (pino negro) y <i>Sorbus aucuparia</i> (serbal)
8	Riofrío de Aliste	2015	Restauración (cantera a cielo abierto)	Ayuntamiento	<i>Juniperus communis</i> (enebro)
9	Pedrajas de San Esteban	2015	Restauración (escombrera)	Ayuntamiento	<i>Retama sphaerocarpa</i> (retama), <i>Rosa canina</i> (rosal), <i>Quercus ilex</i> (encina) y <i>Salix fragilis</i> (sauce)
10	Matallana 2	2015	Experimentación	Diputación de Valladolid	<i>Pinus halepensis</i> (pino) y <i>Quercus ilex</i> (encina)
11	La Mudarra	2015	Restauración (escombrera)	Ayuntamiento	<i>Pinus halepensis</i> (pino) y <i>Quercus ilex</i> (encina)

4.2. PLATAFORMAS DE VUELO

Las aeronaves o RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) utilizadas en las distintas experiencias se han agrupado en dos apartados. Por un lado vamos a describir los tres multirrotores con los que hemos trabajado, también llamados multicópteros o plataformas de ala rotatoria y, por otro lado, la plataforma de vuelo de ala fija que realmente es un pequeño avión. Tanto unos como otros sistemas presentan sus ventajas e inconvenientes y el proceso de evolución que actualmente estamos viviendo es realmente vertiginoso.

Para comprender las características técnicas más destacadas de las cuatro aeronaves y visualizar las ventajas y desventajas de cada una, las hemos agrupado en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Especificaciones de los RPA utilizados en las distintas experiencias

MODELO	FABRICANTE	MOTORES	TIPO	PESO (Kg)	PESO CARGA PAGO (kg)	AUTONOMIA VUELO (comprobada a plena carga) (min)	VUELTA A CASA	SOFTWARE GUIADO	Velocidad vuelo (km/h)	WIND-STOP (Km/h)
MD4-1000	MICRODRONES GmbH	4	ALA ROTATORIA	2.6	1.2	Hasta 60 (14)	Si	MdCockpit-Waypoint Editor	42	47
OCTO XL	MIKROKOPTER	8	ALA ROTATORIA	2.5	2.5	Hasta 40 (10)	Si	WOOKONG-M	50	40
UFOCAMXXL8 V3	MIKROKOPTER	8	ALA ROTATORIA	2.5	2.5	Hasta 40 (10)	Si	MK-TOOL	50	40
SKYWALKER	AIRELECTRONICS	1	ALA FIJA	1.3	3.0	Hasta 60 (40)	Si	U-SEE	55	40

4.2.1. Plataformas de vuelo de Ala Rotatoria (multirrotores)

Son vehículos VTOL (*Vertical Take Off and Landing*), es decir que tienen la capacidad de despegar y aterrizar en vertical desde el propio suelo sin necesitar una pista específica para ello. Son autónomos, o sea que pueden volar con ayuda de los sistemas de control y navegación y únicamente necesitan la ayuda del piloto para despegar y aterrizar, aunque todos ellos disponen de sistemas de vuelta a casa en caso de pérdida de señal con la emisora o cualquier otro tipo de incidencia. Pueden permanecer parados en el aire para tomar las imágenes y se pueden acercar al objeto a fotografiar con mucha precisión. Son vehículos de mecánica compleja y normalmente tienen una autonomía media-baja, como se puede observar en la tabla anterior (sobre todo cuando van cargados con los sensores y cámaras). Pueden volar en condiciones meteorológicas normales con vientos de hasta 40 km/h.

4.2.2. Microdrone MD4-1000

El **Microdrone MD4-1000** de la casa Microdrones (<http://www.microdrones.com/>) fue el primer vehículo y el más utilizado de los experimentos. Con él se realizaron vuelos durante los años 2011, 2013 y 2014. Es un vehículo aéreo, autónomo, con despegue y aterrizaje vertical. Las empresas que lo han utilizado han sido Cartogalicia (en 2011) y Geobit Consulting S.L (2013 y 2014),

Su construcción a base de fibra de carbono lo hace robusto, muy ligero y resistente. Los giros y desplazamientos de la aeronave se consiguen variando la potencia de uno o varios rotores simultáneamente. Por ser de cuatro hélices está encuadrado en el grupo de los cuadricópteros y por tener unas dimensiones pequeñas en la subcategoría micro UAV (Nebiker et al., 2007).



Ilustración 4.2. Microdrone MD4-1000

El software de navegación es el MdCockpit-Waypoint Editor. El vuelo se realiza partiendo de un archivo KMZ específico para Google Earth, con *waypoints* (puntos sobre los que deberá pasar el Microdrone para realizar las capturas de imagen) predefinidos. Con estos puntos, la altura de vuelo y el solapamiento entre fotografías se programa el vuelo de manera automática con el software de navegación del RPA.

El MD4-1000 tiene dos opciones de manejo, vía control remoto por emisora de radiofrecuencia y vía piloto automático que asiste la navegación manual y la navegación bajo GPS. Además, siempre al inicio y al final del vuelo, el piloto toma el mando del RPA por lo que los despegues y los aterrizajes se hacen en el modo manual y una vez que el vehículo está en el aire es cuando se pasa a modo automático.

El peso máximo es de 1.2 kg de carga, que está dentro de los límites para sustentar nuestras cámaras con una autonomía de vuelo aceptable. Aunque en las especificaciones nos hablan de 60 minutos, esta autonomía baja considerablemente cuando porta una carga elevada (a tal efecto realizamos un ensayo que se ha descrito en la tabla 5.1 del apartado 5.2.1. Las especificaciones técnicas del aparato aparecen en la tabla 1, anejo 1.

4.2.2.1. Mikrokopter OKTO XL

Es la plataforma de vuelo utilizada durante el año 2012 por la empresa Fotocopter S.A. Este multirroto de la marca Mikrokopter (<http://www.mikrokopter.de/>) es un vehículo aéreo de pequeñas dimensiones, autónomo, con despegue y aterrizaje vertical, que presenta una fácil construcción y control, siendo una opción de medio coste para este tipo de proyectos. Su

desplazamiento se consigue mediante sus ocho hélices. Los giros y desplazamientos se consiguen variando la potencia de uno o varios rotores simultáneamente.

La emisora de control alcanza los 4 km, pero el modelo básico tiene una limitación electrónica de 500 m de radio alrededor del punto de despegue.

La autonomía de vuelo varía entre 8 y 30 minutos, en función de la carga de pago, pero con la condición normal de carga de nuestros vuelos está en torno a los 10 – 12 minutos.

El software de Guiado es el WooKong-M que tiene la doble opción de manejo manual y mediante piloto automático. El multirrotor sigue la ruta programada de manera automática y siempre bajo la supervisión del piloto encargado de su funcionamiento. En cualquier momento se puede interrumpir el vuelo automático y pasarlo a manual pilotándolo con la emisora.



Ilustración 4.3. Multirrotor Okto XL con cámara Tetracam Mini MCA-6

4.2.2.2. Mikrokopter UFOCAMXXL8 V3

Este multirrotor es una variante del anterior y con él hemos realizado los vuelos en el año 2015. El modelo pertenece a la Universidad de Valladolid.

También lleva la electrónica de Mikrokopter y el mismo sistema de navegación que también puede ser manual o automático. Difiere en el armazón o *frame* que es de base rectangular. El gimbal de fibra de vidrio está estabilizado en dos ejes mediante servos. Soporta cámaras digitales, videocámaras y cámaras térmicas y de infrarrojos.

La emisora de radiofrecuencia de 2,4GHz sistema HOTT Graupner de 12 canales digitales proporcionales, incluyendo palancas y potenciómetros, y su alcance máximo es de 6 km.

Consta de *sticks*, palancas de trimado, interruptores, ruedas de control, batería de 2000mAh Nimh, slot tarjeta micro-sd, pantalla LCD con todos los datos del vuelo. También dispone de sistema audible de telemetría en tiempo real en castellano.

En el modo automático está guiado por GPS en X e Y pero el mantenimiento de la altura se hace de forma automática por sensor de presión atmosférica/GPS/ acelerómetro. El equipo dispone de GPS para que pueda mantener la posición, vuelo asistido, navegación mediante *waypoints* y, en caso de emergencia o pérdida de señal, volverá al punto de despegue.

El alcance viene definido por su electrónica y por la capacidad de las baterías. La corriente de la aeronave proviene de una batería Li-Po de 4 celdas, 5200 mAh y 14,8 v de tensión. Especialmente puede alcanzar los 250 metros ampliables a 500 metros. La altitud de vuelo puede ser de 500m respecto al punto de despegue, pero queda limitada electrónicamente a 120m desde el punto de despegue. El equipo lleva instalados led de alta luminosidad de color rojo en su parte trasera para indicar la situación y posición del equipo en todo momento. Las especificaciones técnicas del equipo aparecen descritas en la tabla 2, anejo 1.

El software de preparación del vuelo es el MikroKopter Tool OSD ó MK-Tool. Tiene capacidad de vuelo autónomo y, en caso de pérdida de señal, baja batería o con el posicionamiento de un interruptor, se inicia la vuelta a casa. También es capaz de especificar al RPA el periodo de tiempo y el grado de precisión que necesita para situarse y permanecer por encima de un *waypoint* para obtener las imágenes.

Al MikroKopter se le ha adaptado un gimbal específico para poder integrar las dos cámaras Olympus PEN E-P1 como se puede ver en la siguiente ilustración.



Ilustración 4.4. Octocóptero UFOCAMXXL8 V3 con dos cámaras Olympus PEN en el gimbal. Vista desde un lateral y desde abajo

4.2.3. Plataformas de vuelo de ala fija

Estas plataformas de vuelo, tipo avión, tienen la ventaja de ser capaces de volar a altas velocidades durante largo tiempo. Para ello cuentan con elementos aerodinámicos más simples. Algunos de ellos son VTOL (despegan y aterrizan verticalmente con la hélice situada en la cola), pero la mayoría despegan a mano o con un lanzador y no requieren pista para el aterrizaje. Tienen menor capacidad de carga y no se pueden detener en el aire para obtener las imágenes pero a cambio tienen mayor autonomía y menor riesgo de accidente.

4.2.3.1. Skywalker

El Skywalker de la casa española Airelectronics (<http://www.airelectronics.es/>) es un avión ligero de ala fija que se lanza a mano y aterriza prácticamente en cualquier superficie. El avión está construido con materiales COTS (*Commercial Off The Shelf*, Solución Comercial

Lista para su Uso) y se ha adaptado para ser un RPA completamente autónomo. Para ello incorpora un autopiloto que gobierna todos los sistemas de control de vuelo y de adquisición de imágenes. Su estructura está formada de materiales compuestos y EPO que hacen del avión un vehículo extremadamente ligero. Este bajo peso, apenas pesa 1,3 kg sin contar carga de pago, hace que el Skywalker pueda realizar aterrizajes en multitud de superficies sin dañar el fuselaje y además le proporcionan una elevada autonomía de vuelo. Bajo las alas lleva adaptadas una cámara en el espectro visible modelo Canon A810 y una cámara multiespectral modelo Tetracam ADC Micro.

El Skywalker no funciona aisladamente y para su correcto funcionamiento necesita además el enlace de comunicaciones y la estación de tierra. Este concepto que agrupa todos los elementos necesarios para el vuelo autónomo es lo que se conoce como *Unmanned Aerial System* UAS o Sistema Aéreo No Tripulado (ver ilustración 4.5).

El avión consta de un motor con una hélice, sistema GPS, sistemas de datos de vuelo, telemetría, control de cámaras añadiendo la georreferencia de las imágenes, emisora, aerofrenos que le pueden permitir acortar la maniobra de aterrizaje en caso de necesidad por fuertes vientos o zonas no demasiado visibles y de un cerebro del sistema de vuelo denominado U-Pilot que gobierna la aeronave. Este autopiloto está embebido en el fuselaje para maximizar el volumen disponible para situar las cámaras.

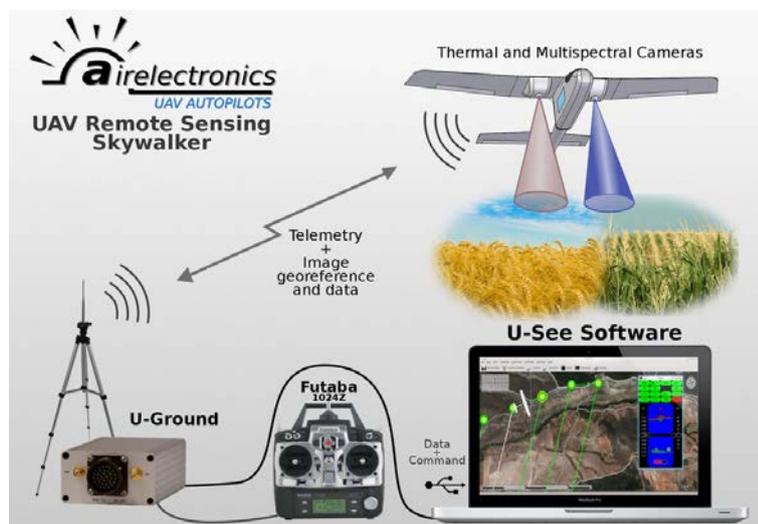


Ilustración 4.5. Componentes del Sistema Aéreo No Tripulado. Fuente: <http://www.airelectronics.es/products/solutions/skywalker/>

El sistema de tierra que se denomina U-Ground actúa de enlace entre el autopiloto y el ordenador. Este sistema cuenta con GPS integrado y salidas PWM estándar para permitir el

direccionado de antenas direccionales para mantener una conexión estable de video. También permite el sobre comando manual mediante emisora.

La batería de Li-Po de 5000 mAh proporciona teóricamente alrededor de 1 hora de autonomía (existe otra de 10000 mAh que la duplica).

El software de planificación y control de vuelo a tiempo real se denomina U-See.



Ilustración 4.6. Iniciando el despegue del Skywalker

El autopiloto es capaz de dirigir la aeronave desde el momento del despegue (ilustración 4.6) para hacerla pasar por los *waypoints*. El operador de vuelo tiene que comprobar que todo está funcionando correctamente y tomar el mando en los momentos necesarios indicando al avión la posibilidad de mantener altura orbitando alrededor de un punto o, si es necesario, habilitar el hipódromo de aterrizaje para aterrizar incluso con menor espacio utilizando los aerofrenos. Las especificaciones técnicas del aparato se resumen en la tabla 3, anejo1.

4.3. CÁMARAS RGB Y MODIFICADAS

4.3.1. Cámara réflex Canon EOS 400D digital

Se utilizó en los primeros experimentos para tomar datos del espectro visible RGB. La cámara es una réflex convencional de objetivos intercambiables. El formato del sensor es de tipo APS-C con un factor de recorte de 1,6 x. Está cámara de la marca Canon (<https://www.canon.es/>) lleva asociada un buen objetivo de la misma marca. Se trata del 20 mm f/2,8 USM, un gran angular de focal fija. Las especificaciones tanto de la cámara como

del objetivo figuran en las tablas 4 y 5 del anejo 1. La cámara montada en el gimbal del microdrone MD4-1000 se muestra en la ilustración 4.7.



Ilustración 4.7. Preparando la Canon EOS 400D con objetivo Canon 20mm f/2,8 USM

4.3.2. Cámara convencional Olympus PEN E-P1 y modificada

Además de realizar los vuelos con la cámara multiespectral, se ha programado de forma paralela, la utilización de dos cámaras comerciales modelo Olympus Pen E-P1 (<http://www.olympus.es/>) con 12.3 Megapíxeles y sensor LiveMOS de formato micro 4/3. Ambas son idénticas pero para nuestros experimentos se ha eliminado, por medio de la empresa Dinasa (<http://www.dinasa.es/>), el filtro de paso bajo (encargado de bloquear el IR) y se ha instalado un filtro IR de paso alto que corta en 720 nm. Este nuevo filtro bloquea el visible y permite captar el IR cercano. Las especificaciones técnicas de esta cámara figuran en la tabla 6 del anejo 1.



Ilustración 4.8. Ajustando cámaras Olympus PEN E-P1 normal y modificada en el gimbal

Con las dos cámaras se empleó el objetivo M.Zuiko Digital ED 12mm f/2. Como su sensor es micro 4/3 de Olympus, el objetivo viene a representar un 24 mm en una cámara de formato completo. Su doble disposición en el gimbal del multirroto se puede comprobar en la ilustración 4.8 y las especificaciones técnicas del objetivo en la tabla 7 del anejo 1.

4.3.3. Cámara RGB compacta Canon A-810

Es una cámara compacta, de la marca Canon, con un sensor CCD de 1/2.3 pulgadas de 16 Megapíxeles (ilustración 4.9). Es muy ligera, apenas pesa 171 gr y tiene la posibilidad de poder adaptar un *firmware* modificado para facilitar las conexiones para el disparo remoto, que se conoce con el nombre de CHDK. Este programa permite la modificación de todos los parámetros importantes que se pueden registrar durante el vuelo, incluido la grabación en formato RAW. Las especificaciones técnicas de la cámara figuran en la tabla 8 del anejo 1.



Ilustración 4.9. Canon A-810. Fuente: Canon. 2014

4.4. CÁMARAS MULTIESPECTRALES

En este apartado se van a describir las características fundamentales de las cámaras multiespectrales que se han utilizado para captar el infrarrojo cercano. Siguiendo un orden cronológico, primero se describe la Tetracam MINI MCA-6 y, a continuación, la Tetracam ADC MICRO, ambas de la marca Tetracam (<http://www.tetracam.com/>). En el periodo 2011 – 2015 la evolución tecnológica que han desarrollado estos captadores ha sido vertiginosa, sobre todo en cuanto a precio y a peso. En general, el proceso tecnológico evoluciona hacia unos sensores cada vez más ligeros, con mayores prestaciones y menor precio.

La tabla 4.3, que figura a continuación, compara las características técnicas y precio de los dos sensores a los que se ha añadido también la cámara Olympus PEN E-P1 modificada para captar el infrarrojo. La finalidad de esta tabla es la de identificar las ventajas e inconvenientes del empleo de cada uno de ellos.

Tabla 4.3. Especificaciones técnicas y precio de las cámaras empleadas en esta investigación

MODELO	FABRICANTE	Nº SENSORES	TIPO	PESO (gr)	RESOLUCIÓN (mpx/sensor)	LONGITUD DE ONDA (nm)	AÑO DE USO	PRECIO (euros)
MINI MCA-6	Tetracam	6	MUTIESPECTRAL	780	1.3 x 6	532-802	2011-2013	13200
PEN E-P1	Olympus	1	RGB Modificada	383 +130 (objetivo)	12.3	720-750	2013-2014	1100 +250
ADC MICRO	Tetracam	1	MUTIESPECTRAL	90	3.2	520-920	2015	4500

La cámara de 6 canales es la más pesada y de mayor precio (además de ser la más antigua). La dejamos de utilizar en 2013 por los problemas expuestos en el apartado 5.2. El sistema de la doble cámara Olympus es el más barato (1100 euros la cámara + 250 euros la modificación), tiene un buen sensor y de buena resolución pero únicamente capta en un corto rango de longitud de onda. La ADC Micro de un único sensor tiene un precio moderado y es la más ligera de peso; a cambio su sensor no tiene demasiada resolución.

4.4.1. Cámara multispectral de 6 canales Tetracam Mini MCA-6

Dispone de seis canales equipados con filtros y lentes de diferentes longitudes de onda. Los seis canales que van integrados en la cámara se denominan: *Master*, *Slave 1*, *Slave 2*, *Slave 3*, *Slave 4* y *Slave 5* y captan longitudes de onda comprendidas entre 531.91 – 802.48 nm. El canal *master* o principal es el responsable de la sincronización de los demás canales y al que va referida la imagen cuando se ve sobre un monitor. La información captada en las distintas bandas del espectro se puede combinar para formar imágenes en color verdadero o en falso color. En este trabajo nos interesa la captura en los canales del infrarrojo cercano (IRc) pues la vegetación sana refleja fuertemente la radiación en esa longitud de onda, mientras que la enferma o rala refleja más luz visible (RGB) y menos luz en el IRc. Las longitudes de onda que recibe cada canal se han descrito en la tabla 9 del anejo 1.

Todos los canales de la MCA deben estar equipados con el mismo tipo de lente para que las imágenes se puedan combinar con un mínimo de error y distorsión. Cada canal tiene un receptáculo para un filtro de espectrómetro estándar. Un filtro óptico es un medio que sólo permite el paso a través de él de luz con ciertas propiedades, suprimiendo o atenuando la luz restante. Los filtros ópticos más comunes son los filtros de color, es decir, aquellos que sólo dejan pasar luz de una determinada longitud de onda. Los filtros se pueden obtener fácilmente de cualquier proveedor comercial.

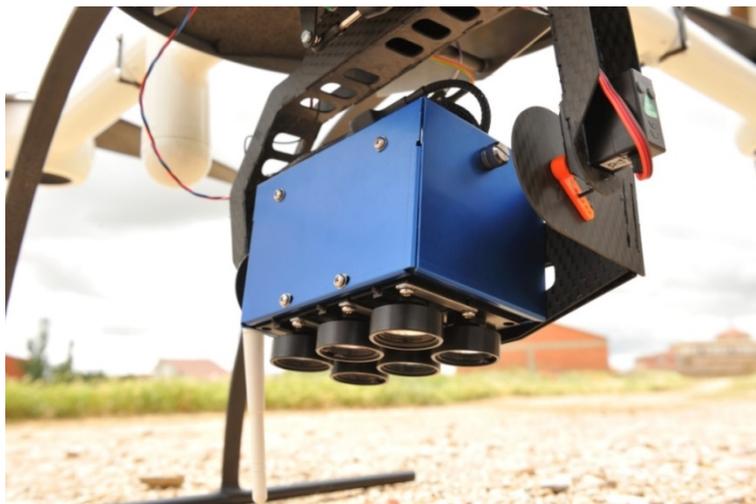


Ilustración 4.10. Tetracam Mini MCA-6 situada en el gimbal del Microdrone MD4-1000

El equipo se suministra con un conjunto de seis filtros que se especifican al cliente en el momento de la compra. Instalar los filtros por primera vez o cambiarlos, requiere de un ajuste del tiempo de exposición para cada canal dependiendo de las características del filtro. En el Mini-MCA se realiza introduciendo las constantes de exposición para cada canal ya que las aberturas de las lentes en la cámara son fijas. Además, antes de realizar el vuelo, los sensores exigen una calibración previa que explicamos en el apartado 5.1.1.1.

Se proporciona junto con la cámara un conector de control (caja de control y accesorios) para permitir que se active durante el vuelo y proporcionar la conexión a un receptor GPS externo. El conector de control también tiene una señal de salida de vídeo que se puede utilizar para visualizar el encuadre de la imagen. La supervisión puede llevarse a cabo de forma remota, utilizando un transmisor de TV disponible para los RPA. El software de procesamiento de las imágenes que viene incluido con la cámara es el Tetracam PixelWrench2. Las especificaciones técnicas de la cámara se han recogido en la tabla 10, anejo 1.

4.4.2. Cámara multispectral de un sensor Tetracam ADC Micro

Cámara multispectral muy ligera, diseñada específicamente para captar la reflectancia de la vegetación. Su acrónimo ADC (*Agricultural Digital Camera*) indica que la cámara ha sido diseñada con fines agrarios. Su único sensor se ha optimizado para capturar bandas roja, verde e infrarroja (aproximación a TM2, TM3 y TM4), captando longitudes de onda de entre 520 nm (luz visible) y 920 nm (infrarrojo cercano). La imagen resultante es pues adecuada para el cálculo de varios índices de vegetación. Tiene salida de vídeo y la posibilidad de

capturar los datos GPS de un receptor externo. Se considera una de las cámaras más avanzadas y ligeras de costo medio-bajo en la actualidad y su peso, no superior a los 90 gr con un objetivo de 8.3 mm, hace que sea adecuada para instalarla en aeronaves de ala fija tipo Skywalker que no poseen una elevada capacidad de carga de pago.

La ilustración 4.11 muestra una imagen de dicha cámara y sus especificaciones técnicas se pueden visualizar en la tabla 11 anejo 1.



Ilustración 4.11. Cámara multiespectral Tetracam ADC Micro. Fuente: Tetracam. 2014

4.5. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El sistema de posicionamiento global Leica System 500 modelo SR530 (<http://www.leica-geosystems.com/>) es un sistema de doble frecuencia y RTK a tiempo real. Este sistema incluye dos receptores SR530, un terminal TR500, dos antenas AT302, dos radio-módems (base y móvil) *Satellite 2ASX* con antenas y trípode, y un conjunto de baterías, firmware, y software (ver ilustración 4.12).

Para transferir las coordenadas registradas en campo y para realizar el post-proceso de los datos, utilizamos el programa para PC llamado SKI-Pro GPS.

Precisiones: centimétrico RTK, precisiones en torno a los 5 mm + 1 ppm para estático rápido y de 3 mm + 1 ppm para estático.



Ilustración 4.12. Leica GPS SYSTEM 500 modelo SR530 y detalle de su pantalla en funcionamiento

Las especificaciones de este sistema vienen resumidas en la tabla 12, anejo 1.

4.6. SOFTWARE

A continuación se describen los programas informáticos que se van a utilizar en el presente trabajo. Se han dividido en cinco grupos en función de su finalidad: software de navegación y planificación de los vuelos, software del sistema GPS y software específico utilizado en el procesado de cámara multiespectral de 6 canales, de la cámara convencional y modificada y de la cámara multiespectral de un sensor.

4.6.1. Software utilizado para planificar y pilotar las aeronaves

- **MdCockpit-Waypoint Editor** es el software que gobierna el Microdrone MD4-1000. Posee una interfaz gráfica que ofrece la posibilidad de planificar, verificar y exportar las rutas generadas a Google Earth. Una vez ha despegado, el RPA sigue la ruta programada de manera automática y siempre bajo la supervisión del técnico encargado de su funcionamiento, teniendo éste la posibilidad de interrumpirla si fuese requerido, mediante el control remoto. Si ocurriese un percance o cualquier tipo de problema, el piloto siempre puede tomar el mando del aparato y sobrecomendarlo en modo manual a través de la emisora.
- **WooKong-M y Mk-Tool:** Son los dos programas de MikroKopter que permiten la navegación y planificación de los vuelos de sus multirrotores. El programa es robusto y sencillo en su manejo y también trabaja con imágenes descargadas de Google Earth. La planificación se realiza en gabinete o en campo y en la pantalla del ordenador se recogen a tiempo real las situaciones de vuelo para la toma de

decisiones por el operador. En la ilustración 4.13, se puede ver un momento del vuelo y de la planificación del mismo.



Ilustración 4.13. Chequeando el vuelo "a tiempo real" (izquierda) y posicionando un *waypoint* (derecha)

- **U-See:** es el software del avión Skywalker, con el que el operador de vuelo va a monitorizar y comandar la misión. El motor de configuración de vuelos se conecta a través de internet y descarga automáticamente los mapas georreferenciados sin intervención del usuario. Para operaciones futuras sin conexión online, el programa guarda en caché local los mapas precargados de las zonas visualizadas. Toda la información del vuelo viene desde el autopiloto, de este modo el operador puede estar seguro de que la información que aparece en pantalla es la que se está usando para navegar y controlar el vuelo.

4.6.2. Software utilizado por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

- **SKI-Pro GPS (Static Kinematic Professional):** es el software utilizado para el post-proceso de los datos obtenidos con levantamientos GPS, incluyendo mediciones en tiempo real, realizados con el Leica System 500 modelo SR530. Sus principales funciones son: Importación y exportación, administración y procesamiento de datos, ajuste de redes y transformación de coordenadas. Puede importar ficheros RINEX y exportar a programas SIG/DAO. Se ha utilizado para corregir los puntos de control tomados antes de cada vuelo.

4.6.3. Software utilizado en procesado de la cámara multiespectral Tetracam Mini MCA-6

- **PixelWrench2** es el software de pre-procesado de las imágenes que viene incluido con las cámaras Tetracam. Es un software de edición de imágenes de gran alcance

con varias herramientas específicas para trabajar con imágenes multispectrales. Proporciona un control completo de la cámara y la gestión de imágenes.

- **ArcGIS 9.2** de la casa Esri (<http://www.esri.es/>) se va a utilizar para la georreferenciación de cada imagen y la creación de los mosaicos resultantes de cada pasada de vuelo. Este programa se compone de varios módulos integrados como son el ArcMap, ArcCatalog y ArcReader. En la investigación únicamente se ha utilizado el primero de ellos ArcMap, que es la aplicación central de ArcGIS. Este módulo se usa para todas las actividades relacionadas con el mapeo, incluyendo cartografía, análisis de mapas y edición. Fue el módulo que utilizamos para la georreferenciación de las imágenes y la creación posterior del mosaico.
- **PCI-Geomática v10** de la marca PCI Geomatics (<http://www.pcigeomatics.com/>) se va a utilizar para el tratamiento digital de las imágenes multispectrales. Consta de varios módulos: Focus, PCI Modeler, EASI, OrthoEngine, Fly y ChipManager. Focus integra las tecnologías de PCI para teledetección, procesamiento de imágenes, SIG/Análisis espacial, y edición cartográfica dentro de un sólo entorno integrado. Este ha sido el único módulo utilizado para visualizar, tratar, analizar, filtrar, interpolar y clasificar las imágenes y también para el análisis espacial y de MDT.
- **Kolor Autopano PRO** (<http://www.kolor.com/>) software que es capaz de realizar mosaicos de manera automática sin necesitar imágenes georreferenciadas. Se ha utilizado en casos puntuales donde no existía el dato geográfico integrado en la imagen y no se ha podido emplear ArcGIS.

4.6.4. Software utilizado en procesamiento de cámaras convencionales

- **Agisoft PhotoScan (PS)** de la casa Agisoft LLC (<http://www.agisoft.com/>), es el *software* de procesamiento con el que se ha realizado el procesamiento fotogramétrico de las imágenes digitales obtenidas con las cámaras fotográficas. Se trata de una de las principales soluciones informáticas de restitución fotogramétrica, de tipo comercial, disponibles actualmente que implementa la SFM-DMVR. Estas siglas hacen referencia a la Fotogrametría Digital Automatizada SFM (*Structure From Motion*) y a los algoritmos de reconstrucción en 3D de alta densidad a partir de múltiples puntos de vista DMVR (*Digital Multi-View 3D Reconstruction*), que permiten producir modelos 3D de alta precisión y calidad fotorrealista a partir de una colección de imágenes desordenadas de una escena u objeto, tomadas desde diferentes puntos de vista.

- **PCI-Geomática v10.** El posterior tratamiento digital de las imágenes también se va a realizar con el programa PCI-Geomática v10 del que ya hemos explicado anteriormente sus características.

4.6.5. Software utilizado en procesado de la cámara multiespectral Tetracam ADC Micro

Esta nueva cámara multiespectral requiere la utilización de PixelWrench2 y Pix4DMapper para generar los mosaicos de fotografías.

- **PixelWrench2** es el software de pre-procesamiento de las imágenes que viene incluido con todas las cámaras Tetracam MCA, del que ya hemos comentado sus especificaciones.
- **Pix4DMapper** de la casa Pix4d (<https://pix4d.com/>) es un software con funciones similares a las que puede tener Agisoft PhotoScan. Está diseñado para generar cartografía en base a imágenes tomadas con cámaras digitales aerotransportadas. Soporta una resolución de imagen de entrada desde 1 hasta 200 Megapíxeles y es capaz de procesar imágenes obtenidas con cámaras RGB, cámaras multiespectrales y cámaras térmicas. Procesa hasta 10000 imágenes a la vez, con el único requisito de que éstas posean posición GPS.
- **PCI-Geomática v10.** El posterior tratamiento digital de las imágenes también se va a realizar con este *software*.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS



En este capítulo 5 presentamos los métodos utilizados para la consecución de los objetivos planteados en esta Tesis Doctoral.

El proceso que se ha seguido para la identificación de las marras y/o plantas vivas se ha llevado a cabo en un período de cinco años (2011-2015). A lo largo de este tiempo se han ido realizando cambios en los métodos utilizados que procedemos a describir.

En los inicios, periodo 2011-2013, utilizamos como método de recogida de datos la cámara multiespectral Tetracam Mini MCA-6 con dos multirrotores diferentes. A partir del año 2013, por razones diversas, que explicaremos en el apartado 5.2, se abandona ese método incorporando un sistema de doble cámara Olympus *mirrorless* (convencional y modificada para captar el infrarrojo cercano). Este sistema se utilizó con dos multirrotores diferentes preparados para aguantar el mayor peso, con un gimbal especial adaptado a tal efecto. Finalmente, durante el año 2015 ensayamos con una nueva cámara espectral más moderna y ligera que la inicial, la cámara multiespectral Tetracam ADC Micro, montado en un ala fija.

La temporalización de las pruebas, la utilización de las diferentes cámaras multiespectrales y cámaras convencionales modificadas y los diferentes métodos de trabajo, han sido las principales razones por que hemos optado por una presentación diferenciada de cada uno de los métodos, siguiendo un orden cronológico. En la figura 5.1 ilustramos, a modo de diagrama de flujo comparativo, la toma de decisiones realizada en cada uno de los métodos utilizados.

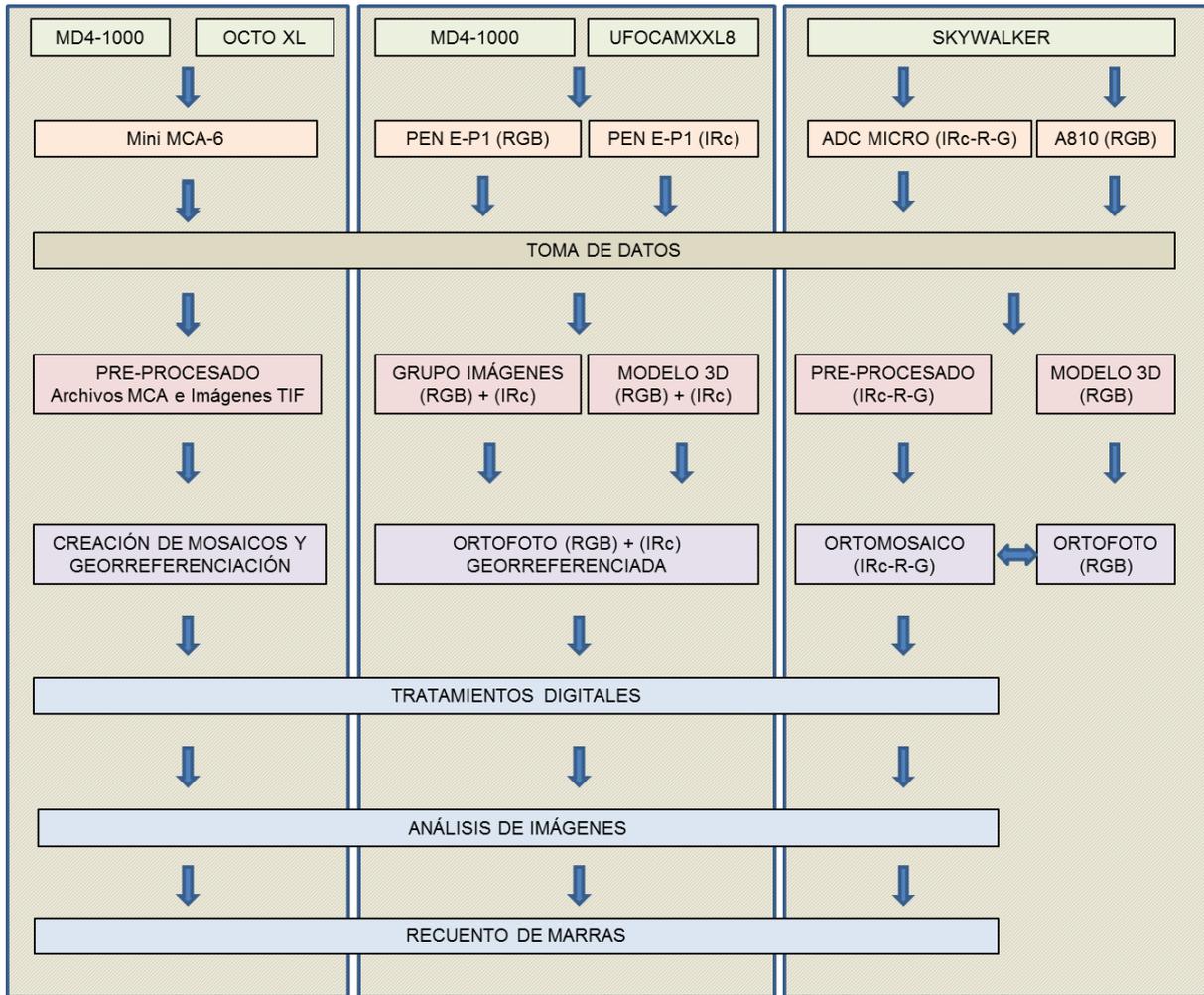


Ilustración 5.1. Análisis de flujo general comparativo de los tres diferentes métodos, según la combinación cámara + aeronave empleada: multispectral de 6 canales (izquierda), cámara RGB + modificada (centro) y multispectral de sensor único (derecha)

5.1. CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES (TETRACAM MINI MCA-6 DIGITAL) + MULTIRROTOR

Durante los años 2010 y 2011 se comenzaron a realizar las plantaciones en los diferentes términos municipales que los socios del proyecto LIFE+ “Los Desiertos Verdes” habían acordado. Como por entonces los plantones eran demasiado pequeños y la mayor parte ni siquiera sobrepasaban la altura mínima del agujero central del Waterboxx preferimos realizar un ensayo previo para intentar identificar las posibles dificultades con que nos íbamos a encontrar en los vuelos de monitorización. Así, durante el verano del año 2011 comenzamos a desarrollar el dispositivo para diferenciar las marras de las plantas vivas mediante cámaras y sensores aeroportados.

Este ensayo tuvo como finalidad estudiar, por un lado, la viabilidad del binomio multirrotor + cámara multiespectral (Tetracam Mini MCA-6 Digital para imágenes de alta gama) para determinar la altura del vuelo máxima a la que es posible identificar marras y, por otro lado, establecer una toma de contacto con el sensor de 6 canales, el archivo de alineamiento, la calibración de la cámara y los tratamientos digitales más adecuados para la identificación de marras.

Esta cámara multiespectral utiliza sensores de tamaño reducido y de muy baja resolución (1.3 megapíxeles por canal, hasta un total de 6) que, en la práctica, limitan la detección de marras a una cierta distancia, en este caso, a la altura de vuelo adecuada. Cuanto mayor es la altura, mayor es el tamaño de cada píxel sobre el terreno y menor es el grupo de píxeles que definen cada plantón. La huella de pixel es muy reducida y el procesamiento digital de las imágenes no va a devolver ningún resultado útil. Además, a mayor altura, menor es el volumen de datos y, por lo tanto, el trabajo de gabinete en el procesado y análisis de las imágenes es menor.

El método empleado con este sensor ha sido laborioso y complejo de llevar a la práctica y el proceso desarrollado, desde el inicio con la toma de datos, hasta las conclusiones finales se puede observar en el diagrama de flujo de la figura 5.2 donde se puede ver que en el proceso de creación de mosaicos y georreferenciación se puede seguir un doble camino: georreferenciación de cada imagen e integración para la obtención del mosaico y ensamblado automático y georreferenciación posterior del mosaico.

Pasamos a describir en los siguientes apartados los pasos seguidos durante la utilización de este método.

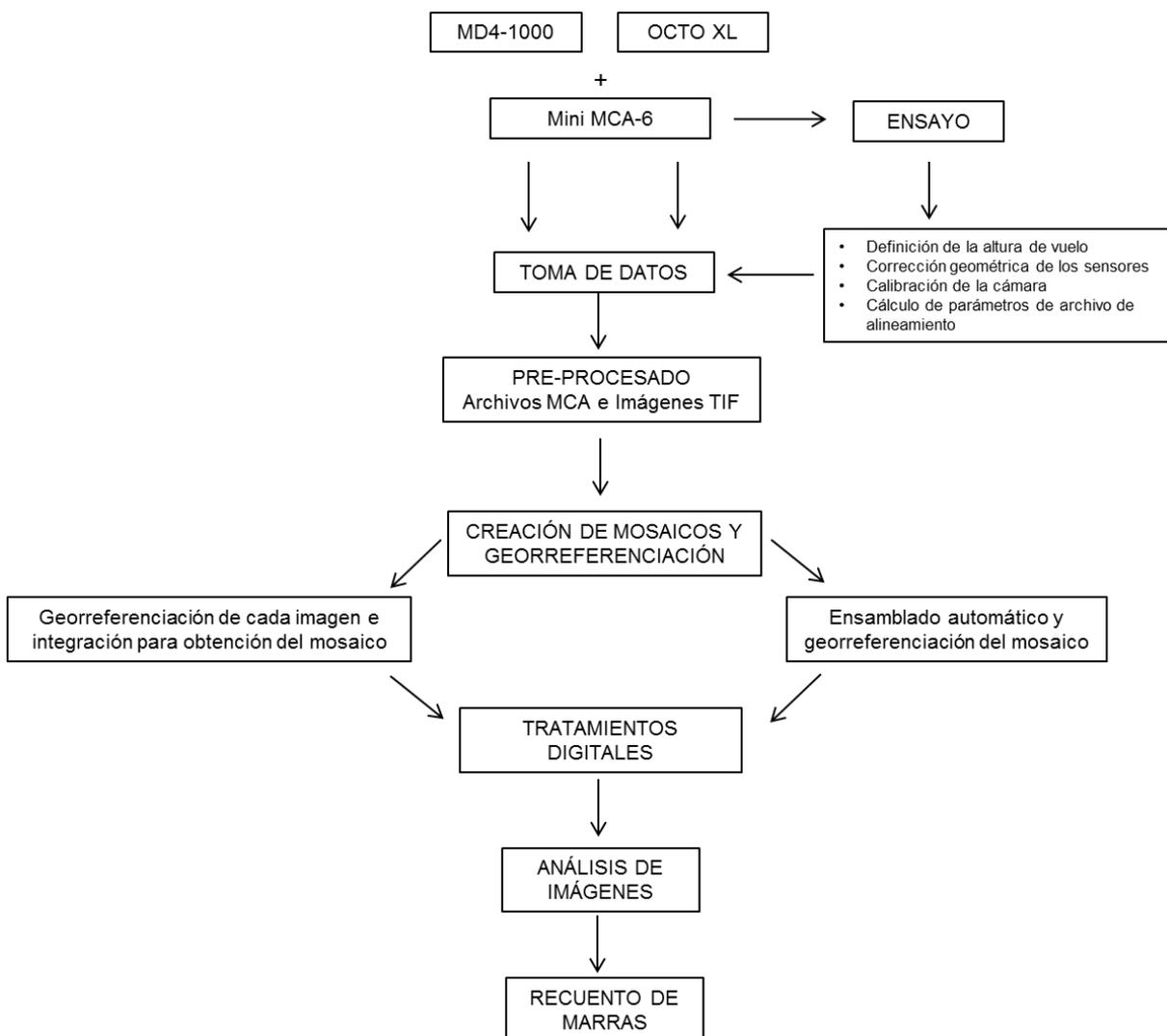


Ilustración 5.2. Diagrama de flujo de la combinación cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor

5.1.1. Toma de datos de campo

Esta fase, que es crucial para el buen desarrollo del experimento, se realiza con el programa de gobierno de la aeronave. Pero antes de introducir las coordenadas de los *waypoints* y la trayectoria a seguir necesitamos, por un lado, conocer la altura de vuelo óptima para la correcta identificación de las marras, el solapamiento entre fotografías y el número de fotos y por otro lado, aprender a calibrar los sensores de la Tetracam. Antes de realizar el primer vuelo, realizamos un experimento previo.

5.1.1.1. Experimento previo al primer vuelo. Año 2011

Para el ensayo previo colocamos los Waterboxx tumbados sobre el asfalto, con idea de realizar la toma de imágenes en horizontal y simular el efecto de la toma de una fotografía en vertical. Para ello recogimos plantones similares a los de la parcela que íbamos a controlar posteriormente y los dispusimos de lado en tres Waterboxx 250 WB Standard de forma que sobresalieran 20 cm aproximadamente (ver ilustraciones 5.3 y 5.4).

Previo a la toma de datos es necesario calibrar la cámara. La calibración consiste en tomar una imagen de la etiqueta de calibración de teflón, en las mismas condiciones de iluminación de las imágenes objeto de estudio. Esta imagen se usa para conocer el balance espectral de la luz del sol del día de la toma de las imágenes. La proporción de R/IRc o V/IRc se aplica como compensación para el cálculo de los distintos índices de vegetación. Si no se toman la imágenes de calibración durante un espacio de tiempo relativamente corto, entre la toma de las imágenes de campo, el cálculo del índice de vegetación no será muy preciso.



Ilustración 5.3. Toma de imágenes y plancha de teflón para el calibrado del sensor

Para ello, se fotografía el patrón de calibración en el suelo teniendo en cuenta que es necesario que llene toda la imagen y que no debe quedar sobreexpuesto. Es necesario además, asegurarse de evitar el reflejo directo del sol. Más adelante, cuando las imágenes se importan en el ordenador, la imagen de calibración se utiliza para afinar los cálculos.

Posteriormente, tomamos las imágenes con la cámara Tetracam MINI MCA-6 a diferentes distancias: 10, 15, 20, 25 y 30 metros, teniendo en cuenta que, según el manual de uso, la altura mínima a la que se deben obtener las imágenes, es de 10 metros pues a esa

distancia el sensor enfoca correctamente y a menor altura empeoraría la calidad en las imágenes.

Una vez tomadas las imágenes, se descargan en archivos con formato RAW propietario de la marca Tetracam. Con el programa PixelWrench2, se crea un archivo de alineamiento de extensión MCA para corregir el desfase entre imágenes producida por cada uno de los diferentes sensores. Este archivo de alineamiento es el almacén de datos utilizado por el programa a la hora de construir un archivo multipágina (archivo generado en formato TIF a partir de cada RAW). Los pasos necesarios para construir este archivo multipágina a partir de los datos de alineamiento se van a explicar más detalladamente en el apartado 5.1.2. A partir de este archivo podemos obtener la composición coloreada y el índice NDVI y determinar que las mejores alturas de vuelo nominal van a ser de 10, 15 y 20 metros debido a la variabilidad de especies diferentes y al solape entre fotografías del 15% (Gil et al., 2013) (ver ilustración 5.4).

Esta experiencia nos ha ayudado a planificar el proyecto de vuelo definiendo los aspectos más básicos como son la altura de vuelo del RPA, el solapamiento entre fotografías y el número de fotos. También hemos comprendido cómo se realiza la calibración de la cámara, cómo se calculan los parámetros del archivo de alineamiento geométrico de los 6 sensores (con el valor añadido de que estos datos se van a mantener invariables para cada altura de vuelo) y, cómo se obtiene la composición coloreada y el índice NDVI.



Ilustración 5.4. Disposición y detalle de tres Waterboxx en la experiencia previa a los vuelos y composición coloreada después de aplicar los tratamientos digitales correspondientes

5.1.1.2. Primer vuelo: Villarramiel (Palencia). Año 2011

La parcela en la que vamos a realizar el primer vuelo se encuentra en Villarramiel, comarca de Tierra de Campos, provincia de Palencia.

La parcela tiene una extensión de 0.4307 ha y se encuentra en el extrarradio del pueblo tal y como se puede observar en las ilustraciones 1,2 y 3 del anejo 2).

Las especies plantadas en esta parcela fueron brinzales de una savia de las especies: *Castanea sativa* (castaño), *Pinus pinaster* (pino), *Quercus Ilex* (encina), *Betula pendula* (abedul) y *Cupressus sempervirens* (ciprés). Todas se plantan sobre Waterboxx de polipropileno, algunas sobre el tipo 250 WB (verde) y la mayoría sobre el 210 WB (amarillo). Las tres especies por lo tanto presentan un porte muy bajo en el momento de la prueba (ver ilustración 5.5).



Ilustración 5.5. Detalle de *Castanea sativa* en un Waterboxx. Año 2011

La parcela se vuela con el Microdrone MD4-1000 de la empresa Cartogalicia. Se realizan dos vuelos, el primero con la cámara multiespectral y posteriormente otro con la cámara réflex Canon EOS 400 D digital. Estas últimas imágenes RGB se van a utilizar para la correcta ubicación geográfica en el post-proceso.

La planificación del vuelo se realiza con el programa MdCockpit-Waypoint Editor en el campo a través de un archivo en formato KMZ de Google Earth determinando en él la zona de estudio a través de *waypoints*, la altura de vuelo y el solapamiento de las imágenes. Debido a las pruebas que realizamos en el ensayo previo, explicado en el apartado anterior, se determina que se van a realizar tres pasadas a 10,15 y 20 metros y un solape del 15%

con el Mini MCA-6. La altura de vuelo con la Canon EOS 400 D se va a realizar a 75 metros porque desde esa altura se puede obtener una imagen de toda la parcela.

Antes de comenzar el vuelo repartimos 7 dianas que se van a utilizar como puntos de apoyo para la georreferenciación de cada imagen y la creación de los mosaicos (tabla 13, anejo 3).

No realizamos un estudio completo de la finca sino que marcamos con cuatro jalones un área de aproximadamente 30 x 40 metros (157 Waterboxx) para que la zona fuese más reducida y contar con puntos de referencia. Además existe en la parcela un 5% de testigos, plantados sin Waterboxx. A cada waterboxx se le numera según su posición en fila y columna mediante unas tablillas colocadas en su lateral.



Ilustración 5.6. Momento del vuelo donde se aprecian los jalones

Tal y como se aprecia en las banderolas incorporadas en los jalones de la figura 5.6, un fuerte viento con rachas superiores a 20 km/h estuvo soplando durante todo el día. Pese a que las previsiones meteorológicas eran positivas, este infortunio condicionó totalmente el resultado final de los mosaicos.

5.1.1.3. Segundo vuelo: San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2012

El segundo vuelo se realizó en la parcela ubicada en el municipio de San Mateo de Gállego (Zaragoza) próximo al desierto de los Monegros en la comarca de Zaragoza.

La parcela monitorizada se encuentra situada al nordeste de la localidad (ver ilustraciones 4,5,6,7 y 8 del anejo 2), tiene una extensión de 1.4068 ha y aparece rotulada con la letra B. No se realiza un estudio completo del terreno, sino que se trabaja en una zona más reducida delimitada por jalones de una superficie aproximada de 0.10 ha (40 x 25 metros).

En la parcela se han plantado *Retama sphaerocarpa* (retama) y *Robinia pseudoacacia* (falsa acacia), aunque todos los ejemplares monitoreados son de esta última especie. Estos se encuentran repartidos uniformemente por la zona monitorizada alcanzando su altura media 45 cm. El modelo de Waterboxx utilizado en la plantación es el 210WB de color amarillo. También se han dejado como testigo, es decir plantadas sin Waterboxx, un 5% de los plantones con la finalidad de medir la efectividad de este sistema de plantación siguiendo los objetivos del Proyecto Europeo LIFE+ “Los Desiertos Verdes”. Sin embargo, para esta Tesis Doctoral, estos ejemplares no serán objeto de estudio.



Ilustración 5.7. Detalle de una de las acacias de San Mateo de Gállego. Año 2012

El RPA utilizado para volar esta parcela es el Multirrotor Okto XL de la empresa Fotocopter que realiza un vuelo con la misma cámara multiespectral empleada en 2011 en Villarramiel y otro con la cámara Canon EOS 400 D Digital.

Para planificar el vuelo se utiliza el programa Wookong-M. La altura de vuelo estimada en 15 metros se basa en los resultados obtenidos en el primer vuelo en Villarramiel (Gil et al., 2013), pero en este caso pensamos que es factible elevar la altura mínima de vuelo desde los 10 hasta los 15 metros porque la acacia es un tipo de plantón diferente al evaluado el año anterior con un porte mucho mayor, superando fácilmente los 40 cm.

Teniendo en cuenta que en el vuelo anterior en Villarramiel, a causa del fuerte viento, los mosaicos no quedaron suficientemente cubiertos con un solape del 15%, y que este vuelo se va a realizar a mayor altura, subimos el solape al 25% para asegurar el debido recubrimiento.

Antes de obtener las imágenes recogimos la situación de cada Waterboxx con las plantas y marras, fotografías de la zona y de la especie estudiada, de forma análoga a lo realizado el año anterior, y repartimos homogéneamente 6 dianas que nos van a servir como puntos de apoyo para georreferenciar los mosaicos (tabla 13, anejo 3).



Ilustración 5.8. Momento del despegue del multirrotor Okto XL portando la Tetracam Mini MCA-6, en San Mateo de Gállego

El vuelo discurrió sin incidencias meteorológicas notables, es una zona desértica de fuertes vientos pero ese día se pudo volar sin grandes problemas como se puede comprobar en la ilustración 5.8.

5.1.1.4. Tercer vuelo: Soto de Cerrato (Palencia). Año 2013.

La parcela de Soto de Cerrato se encuentra ubicada en los campos de experimentación de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Valladolid y está enclavada en la comarca palentina de El Cerrato. La superficie total modelada por la ortofoto es de 3.80 ha (ver ilustraciones 9 y 10 del anejo 2)

Las especies plantadas en la parcela son: *Castanea sativa* (castaño), *Sorbus aucuparia* (serbal), *Corylus avellana* (avellano), *Pistacia vera* (pistacho) y *Prunus dulcis* (almendro). Se han plantado en filas sobre Waterboxx 250 WB standard y 210 WB. Del mismo modo que se ha realizado en otras parcelas, se ha dejado un 5% de plantones testigo. Más adelante, en la ilustración 5.9 se puede ver la disposición en hileras de los Waterboxx.

La fase de fotografiado y toma de datos de campo fue llevada a cabo por la empresa Geobit Consulting S.L que la vuela con el Microdrone MD4-1000 y la cámara multiespectral Tetracam Mini MCA-6. A la empresa se le indica el método de trabajo a seguir en los vuelos,

de acuerdo a las pautas marcadas en el estudio previo que hemos apuntado y el vuelo anterior de San Mateo de Gállego.

Previo al momento del vuelo, marcamos 8 puntos de control y tomamos coordenadas con el sistema GPS Leica SR530 para posteriormente corregir geoméricamente y georreferenciar los mosaicos (tabla 13, anejo 3).



Ilustración 5.9. Disposición de los plantones en filas en la parcela vallada de Soto de Cerrato. Año 2013

Durante el vuelo no se levantaron excesivas rachas de viento y la meteorología fue óptima. La altura nominal prefijada es de 15 metros, para plantones de porte más reducido, y de 20 metros, para especies con porte más generoso y mayor densidad foliar, aunque posteriormente por las variaciones debidas a la precisión del GPS de la aeronave las reales fueron de 14 y 22 metros. En este caso, la mezcla de diferentes especies es la que nos obliga a realizar los vuelos a baja altura. Fijamos un solape mínimo del 20% para garantizar el reconocimiento y ensamblado de los mosaicos.

Aspectos como la elevada extensión superficial de algunas parcelas (como ésta en particular), los problemas asociados al binomio multirrotor/sensor de 6 canales (descritos en el apartado 5.2), las limitaciones propias del *hardware* y las limitaciones en la altura de vuelo han provocado que nos decantemos por la puesta en práctica de nuevos métodos de control de marras basados en imágenes tomadas con una cámara convencional comercial y otra modificada que nos puedan permitir realizar la monitorización de una manera efectiva y diferente. Por este motivo, en esta parcela de Soto de Cerrato, hemos utilizado ambos métodos con la idea de contrastar los resultados entre cada uno de ellos. Esta nueva experiencia de vuelo se describe en el apartado 5.2.

5.1.2. Pre-procesado de las imágenes

Tras la descarga de las imágenes, es necesario comprobar que todos los sensores han realizado el mismo número de capturas. Cada sensor guarda los archivos en una carpeta independiente y, en algunas ocasiones, algún sensor se puede quedar bloqueado y no fotografiar. Este hecho ocasiona una pérdida de información que puede arruinar la fase posterior de tratamientos digitales. Para poder pre-procesar las imágenes utilizamos el software Tetracam PixelWrench2 que viene incluido a adquirir la cámara.

El primer paso es partir de un archivo de alineamiento que corrija el desfase que se produce por la distancia entre los objetivos de los canales. Se trata de una corrección geométrica que se aplica a cada imagen para que el solape entre los 6 canales se realice adecuadamente. Es necesario realizar un archivo de calibración (archivo de extensión MCA) para cada rango de alturas. Este archivo contiene información utilizada para registrar cada imagen de los canales secundarios (*slaves*) y vincularlas al principal (*master*) para escribir un archivo multipágina en formato TIF a partir de los RAW. Cada imagen contiene las 6 tomas correspondientes a cada canal, corrigiéndose también el desfase entre canales. Para ello se utilizan dos valores de traslación enteros con la finalidad de mover cada imagen secundaria en relación con la imagen principal y también dos valores decimales, para rotar y escalar las imágenes esclavas con respecto a la imagen principal. Con la corrección de la rotación se consigue corregir el desplazamiento angular de la matriz de píxeles de los sensores y con la corrección de escala, se corrige la variación en la longitud focal del objetivo y el aumento resultante de la imagen. La escala no cambiará a menos que la lente se reemplace o se realice un re-enfocado, aunque los valores de la escala puede que tengan que corregirse si el filtro para ese canal se sustituye o cambia a otra banda.

Los archivos de alineamiento se realizan una única vez para para cada altura de vuelo y se mantienen invariables para dichas alturas. A modo de ejemplo hemos agrupado bajo la ilustración 5.10 aquellos archivos de alineamiento obtenidos para 10, 15 y 20 metros realizados durante el proceso de experimentación previa a los vuelos.

X	Y	Rotación	Escala
0	0	0	1
-2	4	-.233	1.0040
-8	-1	-.289	1.0015
-3	-2	-.131	1.0005
-4	6	-.328	0.9980
0	6	-.402	0.9978

X	Y	Rotación	Escala
0	0	0	1
-1	2	-.233	1.0040
-4	0	-.289	1.0015
0	-2	-.131	1.0005
-3	5	-.328	0.9980
2	5	-.402	0.9978

X	Y	Rotación	Escala
0	0	0	1
-2	1	-.233	1.0040
-5	-2	-.289	1.0015
-1	-2	-.131	1.0005
0	3	-.328	0.9980
1	2	-.402	0.9978

Ilustración 5.10. Archivos de alineamiento a 10 m (izquierda), 15 m (centro) y 20 m (derecha)

El archivo de corrección MCA que realiza el software Tetracam PixelWrench2 se necesita para crear posteriormente las imágenes multipágina TIF. Este archivo multipágina recoge las seis imágenes de cada canal para la misma toma. En este formato ya se pueden analizar visualmente las imágenes para comprobar la calidad de las mismas y del solape, así como del apilado y el fotografiado.

Para este estudio de control de marras es necesario obtener una composición coloreada de la imagen donde exista mayor reflectividad en zonas con alta densidad de vegetación. El paso de cada multipágina TIF a la composición en falso color se realiza también con el software Tetracam PixelWrench2. Con el programa iniciado en *View-IndexTools*, en la pestaña MCA, se seleccionan, en cada región del espectro, el canal de color que le corresponde para la composición IRc, sustituyendo la composición R/G/B por la correspondiente IRc/R/G que se corresponde con las bandas 5/4/2 del sensor. De esta manera, al ser la más ajustada visualmente, podemos comprobar con la vista la calidad de vuelo y obtener la composición coloreada (donde las zonas con mayor reflectividad en la región del espectro del infrarrojo cercano se correspondan con las de mayor densidad de vegetación). Este procedimiento empleado se puede apreciar en la ventana de la ilustración 5.11.

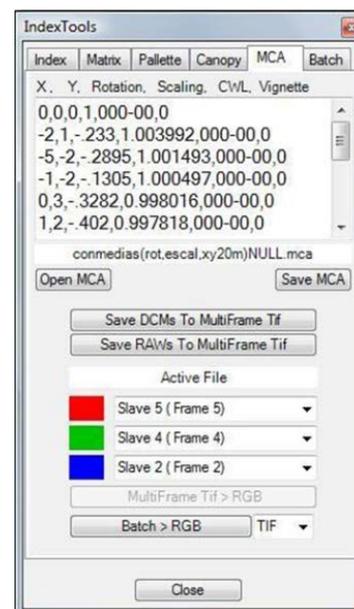


Ilustración 5.11: composición en falso color 5/4/2

5.1.3. Creación de mosaicos y georreferenciación

Para crear el mosaico de imágenes se puede proceder de dos modos diferentes: o bien proceder a georreferenciar cada una de las imágenes del vuelo y enlazarlas con Arc Gis para obtener el mosaico ya georreferenciado, o bien utilizar el software Kolor Autopano PRO, que realiza un ensamblado automático de la imagen y posteriormente, proceder a la georreferenciación del mosaico obtenido. A continuación pasamos a explicar cada uno de los dos procedimientos.

5.1.3.1. Georreferenciación de cada imagen y fusión para obtención del mosaico

En el caso de que existan diferentes alturas de vuelo o mucha distancia entre la posición de la toma de dos imágenes consecutivas y, por lo tanto, tengan los objetos comunes en

ambas distintas dimensiones, es necesario aplicar la georreferenciación individual de cada imagen.

Por ejemplo, en el vuelo de Villarramiel del año 2011, la inclinación de la cámara respecto al suelo no fue constante en todas las imágenes, debido fundamentalmente a las condiciones climáticas (excesivo viento). Además muchas aparecieron borrosas y se tuvieron que desechar. Esto provocó que existiesen zonas del área de estudio que no quedaron recogidas en ninguna imagen y en las que no se produjo el recubrimiento mínimo deseado.

Para estos casos la forma de proceder consiste en georreferenciar cada una de las imágenes y posteriormente realizar el mosaicado de todas las imágenes por pasadas con la ayuda del módulo ArcMap del software ArcGis.

Las imágenes aéreas tomadas con la cámara multiespectral aparecen en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo matricial. El proceso de georreferenciación consiste en asignar a esa imagen coordenadas geográficas procedentes de una fuente de referencia conocida. Para ello utilizamos como imagen de referencia el vuelo con la cámara RGB Canon EOS 400D DIGITAL tomada a 75 metros de altura donde se puede apreciar la totalidad de la zona a estudiar. Georreferenciamos esa imagen apoyándonos en los puntos de control tomados con el sistema de posicionamiento global SKI-Pro GPS, corregidos diferencialmente con los datos GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de la red de estaciones del ITACYL (Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León). Se necesita un sistema de precisión para poder georreferenciar los mosaicos y, aunque no es necesario que sea a tiempo real, hemos preferido utilizar la estación Leica System SR530 por ser el modelo de mayor precisión de que disponemos en el área de conocimiento de la Universidad de Valladolid.

Con estos puntos ya definidos es necesario aplicar un procedimiento para transferir la información de los píxeles originales a los píxeles resultantes del proceso de transformación. El trasvase de valores de la capa original a la transformada puede abordarse por tres métodos dependiendo del tipo de datos: vecino más próximo, interpolación bilineal y convolución cúbica. Nosotros lo realizamos aplicando el método de vecino más próximo en el que se sitúa en cada píxel de la imagen corregida el valor del píxel más cercano en la imagen original. Es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales aunque introduce una pequeña distorsión.

Los Waterboxx controlados con GPS para monitorizar el crecimiento de las plantas también nos van a servir como puntos de control para la corrección del resto de las imágenes.

Por las características de nuestras imágenes, el mosaicado de todas las imágenes georreferenciadas se va a realizar con el módulo ArcMap de ArcGis 9.2, utilizando el método de superposición de imágenes. Para ello, superponiendo dos imágenes se seleccionan los valores de la primera, tal y como muestra la ilustración 5.12.

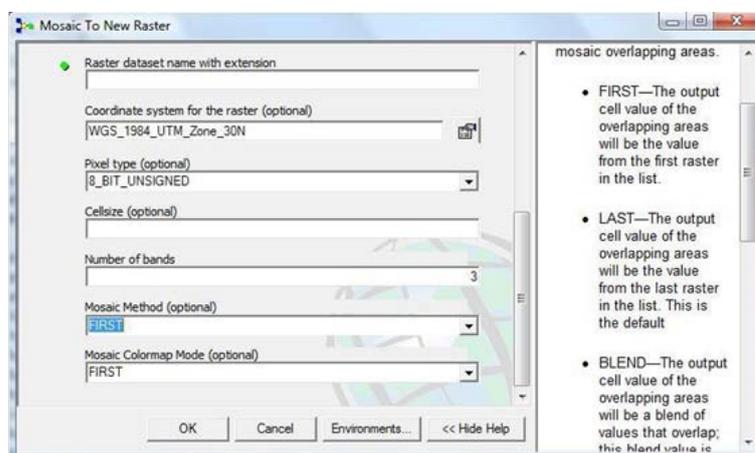


Ilustración 5.12. Creación del mosaico con el módulo ArcMap de ArcGis 9.2

Con este método se han obtenido los tres mosaicos en Villarramiel. Cada uno corresponde a cada una de las pasadas realizadas a diferentes alturas 13.7, 18 y 22.5 metros (ver figura 6.1 del capítulo 6)

Con cada mosaico se reduce el volumen de datos y se pasa del análisis individual de cada fotografía al análisis conjunto de tres imágenes, una por cada uno de los vuelos, lo que facilita enormemente los posteriores tratamientos.

A partir de estos mosaicos obtenidos se van a aplicar los tratamientos digitales que describiremos en el apartado 5.1.4, aunque la zona común de los tres mosaicos va a quedar más limitada en tamaño, tal y como se puede observar en el la figura 6.2 del capítulo 6.

5.1.3.2. Ensamblado automático y georreferenciación posterior del mosaico obtenido

El ensamblado automático de las imágenes es el modo más sencillo para obtener el mosaico y simplemente consiste en seguir las recomendaciones del manual de la cámara y utilizar el *software* Kolor Autopano PRO. Este programa ensambla de forma rápida y precisa imágenes consecutivas formando la pasada completa. Con el mosaico se puede reducir el volumen de datos y nos permite pasar del análisis individual de cada fotografía al análisis del conjunto de la parcela. Los mosaicos son, pues, un conjunto de imágenes ensambladas con un sistema matricial arbitrario de píxeles organizados en filas y columnas que se realizan por cada altura de vuelo.

Con el Kolor Autopano PRO formamos en realidad dos mosaicos con tres canales cada uno, que se superponen para conseguir contener los seis canales en un único mosaico. Al tener que realizar dos mosaicos no se consigue un solape perfecto entre los distintos canales de la cámara, lo cual supone un pequeño error. Para superponer los mosaicos obtenidos se necesita emplear la opción OrthoEngine del programa PCI Geomática, con el que cargando en él los dos mosaicos obtenidos y puntos comunes a ambos, se consigue un mosaico final que contiene los seis canales.

Cada mosaico se debe georreferenciar apoyándose en los puntos de control tomados en cada parcela de forma previa a la realización del vuelo. Este paso se va a realizar mediante el *software* SKY-Pro de Leica y su corrección diferencial utilizando los datos GNSS tal y como hemos explicado en el apartado anterior. Este proceso también se realiza con la opción OrthoEngine.

De esta forma se obtiene un mosaico georreferenciado por cada vuelo que permite aplicar los tratamientos digitales necesarios y un posterior análisis para identificar las marras.

5.1.4. Tratamientos digitales

El procesamiento digital de imágenes tiene como propósito fundamental obtener, a partir de una imagen origen, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica. El tratamiento digital supone la mejora de ciertas características de la imagen de tal manera que posibilita efectuar operaciones del procesado sobre ellas. Para nuestra investigación, se nos muestra imprescindible mejorar la calidad de la imagen mediante tratamientos digitales adecuados para el análisis de la vegetación, puesto que nuestra finalidad es la determinación de las plantas vivas y las marras en los Waterboxx.

Consideramos interesante comprobar qué índices de vegetación nos van a servir en nuestro propósito de detección de marras y qué tratamientos digitales van a facilitar la búsqueda de información. Para ello, acudimos a las siguientes técnicas de tratamientos digitales.

5.1.4.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI *Normalized Difference Vegetation Index* (Tucker, 1979) queda definido por la siguiente fórmula empírica:

$$NDVI = \frac{(IRc - R)}{(IRc + R)}$$

En donde las variables IRc (Infrarrojo cercano) y rojo están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación incidente en cada banda espectral individual. Esta relación proporciona valores entre -1,0 y + 1,0, en donde valores negativos y valores bajos del índice implican ausencia de vegetación y valores altos indican mayor vigor vegetal. Sellers (1985) relacionó este índice con la capacidad fotosintética. Este índice es uno de los más conocidos y utilizados.

5.1.4.2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El SAVI *Soil Adjusted Vegetation Index* nació como una necesidad de disminuir las alteraciones del valor de NDVI al estudiarse en zonas áridas, ya que el mismo valor de NDVI podría corresponder a cubiertas vigorosas pero poco densas, o a cubiertas densas pero con poca vitalidad (Huete, 1988).

Es así como se modificó la ecuación del NDVI y se muestra con la siguiente fórmula:

$$SAVI = \left[\frac{(IRc - R)}{(IRc + R + L)} \right] (1 + L)$$

En donde: L= constante de ajuste de la línea de vegetación-suelo al origen (0.5 para densidades intermedias de vegetación). Este factor está determinado por el porcentaje relativo de la vegetación y si el suelo es claro u oscuro.

5.1.4.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (Green NDVI)

El índice para la estimación de la clorofila no puede variar con respecto a otros pigmentos de clorofila y no debería estar influenciado por otros factores. Se demostró que la sensibilidad máxima se lleva a cabo a partir de 520 nm a 630 nm. La menor variación de reflectancia se encuentra cercana al infrarrojo (por encima de 750 nm) y en las zonas azules (de menos de 500 nm) del espectro. El NDVI verde o *Green NDVI* se calcula como:

$$Green\ NDVI = \frac{(IRc - G)}{(IRc + G)}$$

El índice Green NDVI es mucho más sensible a la concentración de clorofila que el NDVI original (Gitelson and Merzlyak, 1997).

5.1.4.4. Realce de contraste

Técnica que busca un mayor contraste entre los Niveles Digitales (ND) ya que puede existir poco contraste entre los niveles máximo y mínimo de la imagen. Los ND de la imagen no suelen coincidir con los niveles de gris de cada banda en el monitor (rango de 0 a 255), por ello se ajusta el contraste empleando una función de transferencia que traspassa los valores de ND a niveles de gris del monitor a través de una tabla de referencia de color. Las tablas indican el nivel de gris con el que aparecerá en la pantalla cada ND.

Cuando el rango ND de la imagen es menor que el rango NV del monitor se realiza una expansión o realce del contraste, que es lo más habitual. Nosotros lo aplicaremos a nuestras imágenes con el fin de poder mejorar la respuesta espectral de las distintas cubiertas. El procedimiento para realizarlo es mediante la ecualización del histograma. En este proceso se asigna el ND máximo del histograma al nivel de gris blanco (255) y el ND mínimo al nivel de gris negro (0), el resto de ND se distribuyen teniendo en cuenta la forma del histograma, o sea la frecuencia en la que aparece el ND en la imagen, elevando el realce a los más frecuentes.

5.1.4.5. Análisis de Componentes Principales (ACP)

El análisis de componentes principales consiste en convertir un conjunto de bandas con alto grado de correlación entre ellas en otro conjunto de bandas diferentes totalmente incorreladas. Esto se consigue considerando el sistema inicial y el final como un espacio n -dimensional (siendo n el número de bandas) y localizando una matriz que permite diagonalizar dicho sistema. La obtención de un sistema diagonal garantiza la propiedad de incorrelación entre los nuevos ejes (en nuestro caso representando a las bandas). La ventaja de la utilización de este mecanismo radica en que la mayor parte de la información recae en las tres primeras bandas creadas (se estima entre un 95% y un 99%), lo cual permite mantener gran parte de la información con una reducción drástica de espacio.

La técnica sirve para hallar las causas de la variabilidad de un conjunto de datos y ordenarlas por importancia buscando la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados.

El ACP construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente.

El algoritmo que se encarga de realizar el ACP por este método se encuentra contenido dentro de la librería de algoritmos de PCI-Geomática. Los pasos para realizar el análisis de componentes principales son:

- **Análisis de la matriz de correlaciones:** un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y, por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.
- **Selección de los factores:** la elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.
- **Análisis de la matriz factorial:** una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables (las correlaciones entre las variables y los componentes principales). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables.

5.1.4.6. Filtros

Mediante las técnicas de filtraje se suavizan o refuerzan los contrastes espaciales, que es la diferencia de ND de un pixel y los píxeles vecinos. El filtraje implica por tanto una modificación de los ND originales.

El filtraje consiste en aplicar una matriz de coeficiente de filtraje (CF) denominada Kernel a los ND originales de la imagen.

En nuestro procedimiento hemos aplicado filtros de paso alto. Este tipo de filtros atenúan las frecuencias bajas manteniendo invariables las frecuencias altas. Puesto que las frecuencias altas corresponden en las imágenes a cambios bruscos de densidad, este tipo de filtros ofrece mejoras en la detección de bordes en el dominio espacial (precisamente los bordes contienen gran cantidad de dichas frecuencias), reforzando los contrastes que se encuentran en la imagen.

Dentro de los filtros de paso alto, hemos aplicado el filtro de contorno (también conocido como filtro Sobel) que se centra en las diferencias de intensidad que se dan pixel a pixel. Se

ha utilizado para obtener los contornos de objetos y de este modo ayudar a clasificar las formas existentes dentro de una imagen.

5.1.5. Análisis de las imágenes tratadas

Por último, en base a los resultados obtenidos se realizará un análisis de las imágenes mediante interpretación visual intentando, en la medida de lo posible, realizar una clasificación temática que sirva para automatizar los resultados.

5.2. CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA (OLYMPUS PEN E-P1) + MULTIRROTOR

Utilizando el método expuesto en el apartado 5.1, nos dimos cuenta que en vuelos a baja altura y con los sensores y hardware más primarios se producían los problemas técnicos que detallamos a continuación:

- La escasa resolución de los sensores requiere un tiempo de exposición mayor que el de una cámara fotográfica convencional, para evitar el aumento de ruido en la imagen. Si a esto le añadimos la inestabilidad de los RPA (este tipo de plataformas se está moviendo y vibrando continuamente) el resultado es un porcentaje elevado de fotografías borrosas que carecen de información útil.
- La correcta realización del mosaico de imágenes y su interpretación dependen enormemente de que la cámara se encuentre en una posición perfectamente vertical. El viento complica este aspecto y en muchas ocasiones las imágenes se toman con cierta inclinación.
- El efecto del viento afecta también al recubrimiento (solape entre imágenes) longitudinal y transversal entre las fotografías, lo que repercute también en la incorrecta generación del mosaico.
- La cámara sobreexpone aleatoriamente algunas capturas, lo que afecta fundamentalmente a la región del espectro del infrarrojo, lo que implica el tener que desechar parte del material registrado.
- La transmisión de la vibración del RPA a la cámara provoca el efecto del *rolling-shutter* o aspecto vibrado en las imágenes, lo que nuevamente impide el empleo de todo el material registrado.

Además, el proceso de creación y georreferenciación de mosaicos con este método es muy tedioso y poco operativo en situaciones de conteo masivo de marras en parcelas grandes.

Por estos motivos, decidimos que era necesario comparar esta tecnología con una nueva forma de control. Para ello optamos emplear un sistema de doble cámara: una cámara RGB convencional, y otra idéntica a ella pero modificada, de manera que, eliminando el filtro de paso bajo y montando un filtro IR 720 nm, fuera capaz de bloquear el espectro visible y capturar el infrarrojo cercano.

Para poder realizar la captura de imágenes tenemos dos posibilidades. O bien realizar un vuelo con cada una de las cámaras para conseguir, por un lado, las bandas RGB, con una

de ellas y el infrarrojo cercano con la modificada o, por el contrario, habilitar un gimbal que soporte el peso de ambas y pueda dispararlas simultáneamente. Esto último es lo más aconsejable porque economizamos los vuelos, y además, las cámaras toman las imágenes en las mismas condiciones de luz y desde idénticas posiciones. Sin embargo en un principio, no disponíamos de esta posibilidad y los primeros vuelos se hacían de dos pasadas.

La altura de vuelo con este tipo de cámaras se puede fijar en 60 metros, gracias a que el tamaño y la resolución del sensor de las EP-1 son menos restrictivos que los de la multiespectral. Fijamos un solape mínimo, longitudinal y transversal del 70% y 40% respectivamente, para garantizar la correcta generación del modelo 3D con Agisoft PhotoScan.

Para georreferenciar el modelo 3D, también es necesario que tomemos puntos de control en campo, fácilmente identificables en las fotografías. Fijamos un mínimo de 5 y máximo de 10 puntos de control por parcela.

Una vez generados los modelos 3D de calidad (uno para la cámara RGB y otro para la IRc) se exportan como ortofotos georreferenciadas, que se deberían de solapar perfectamente entre ambas pues tienen los mismos puntos de control. Los tratamientos digitales y el análisis posterior se realizan de la misma manera que en el apartado anterior. Para una mayor claridad expositiva hemos elaborado el diagrama de flujo, tal y como se muestra en la figura 5.13 que presentamos a continuación.

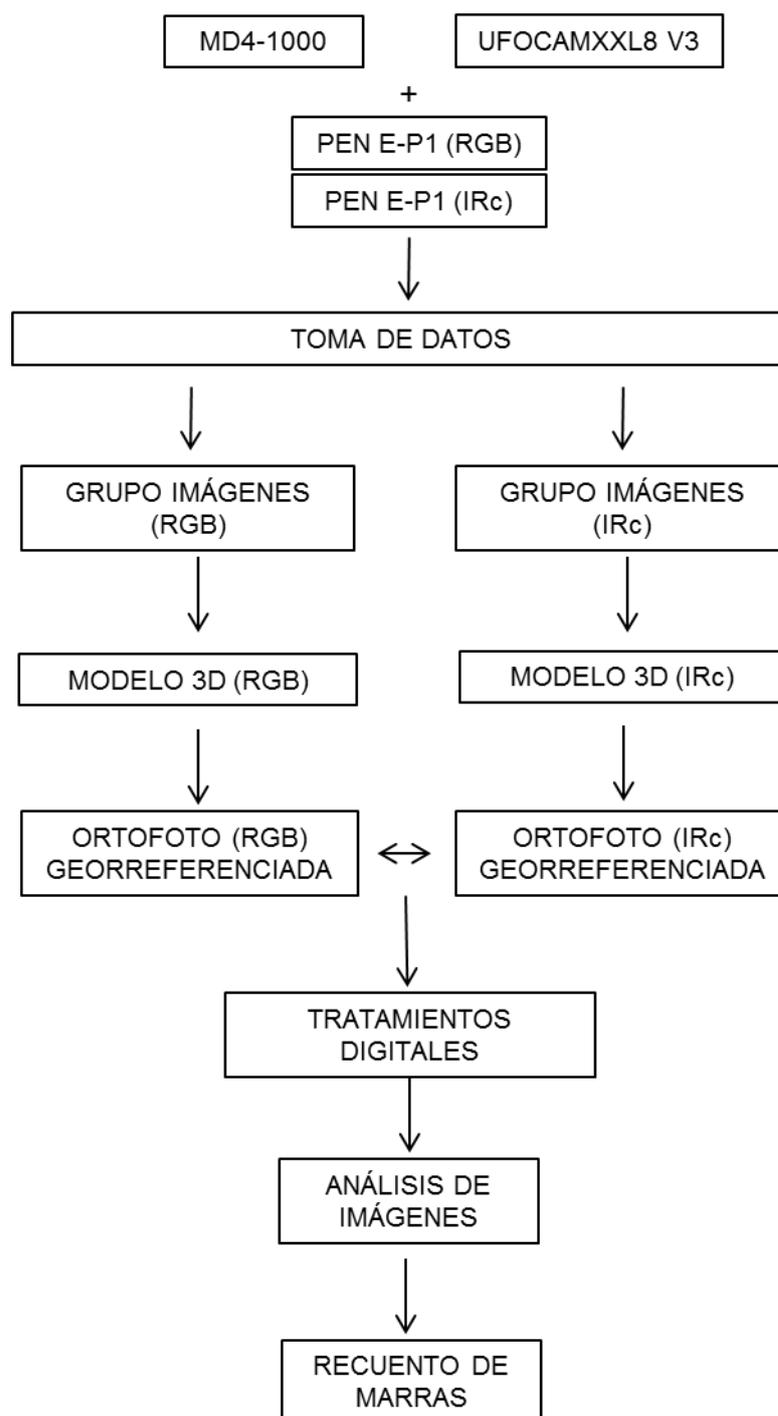


Ilustración 5.13. Diagrama de flujo de la combinación cámara fotográfica convencional y modificada + multirrotor

5.2.1. Toma de datos de campo

Aunque la carga de pago del Microdrone MD4-1000 figura en las especificaciones como de 1.2 kg, necesitamos conocer si el aparato puede levantar ese peso y, sobre todo, cuál es su autonomía a plena carga. Tras varios intentos, comprobamos que efectivamente es capaz de soportarlo. Este hecho nos va a proporcionar un alivio puesto que las dos cámaras y el gimbal necesario para sujetarlas van a alcanzar esta magnitud. Pero a mayor peso, menor autonomía de vuelo, y este axioma se ha de tener en cuenta para la planificación de los vuelos. Por esta razón, se han testado diferentes baterías y diferentes pesos obteniéndose los siguientes valores que aparecen en la tabla 5.1 a continuación.

Tabla 5.1. Chequeo realizado para comprobar la autonomía del Microdrone MD4-1000

Autonomía de las baterías (chequeo)	Li-Po de 5200 mAh y peso total de 3 Kg: 12 - 14 minutos
	Dos Li-Po 5200 mAh y peso total de 3.5 Kg: 8 - 10 minutos
	Li-Po 6600 mAh y peso total de 3.2 kg: 15 - 18 minutos
	Dos Li-Po 6600 mAh y peso total de 3.8 Kg: 11 -14 minutos

5.2.1.1. Cuarto y quinto vuelos: Soto de Cerrato (Palencia). Años 2013 y 2014

Por los motivos explicados en el apartado 5.1.1.4, volvimos a volar la parcela vallada de los campos de experimentación de la ETS Ingenierías Agrarias situada en el término municipal de Soto de Cerrato (ilustraciones 9 y 10 del anejo 2), pero esta vez utilizando un nuevo método con una cámara *mirrorless* (sin espejo) convencional y otra idéntica pero modificada para captar el Infrarrojo cercano. La meteorología del día de vuelo y la disposición de las plantas en hilera ya se han descrito anteriormente en ese mismo apartado.

Los vuelos se realizan también con la empresa Geobit Consulting y el Microdrone MD4-1000. Se respetan los parámetros de vuelo fijados (un solape mínimo, longitudinal y transversal del 70% y 40%).

El vuelo del año 2013 se realiza en dos fases: en primer lugar se vuela a una altura de 66 metros con la cámara convencional RGB y posteriormente a 68 metros con la infrarroja (figuras 39 y 40, anejo 6.1). Se modela la finca completa.

En cambio durante el año 2014, aunque se vuela a una altura similar (63 metros), se realiza con un soporte adaptado para elevar las dos cámaras simultáneamente, realizando un único vuelo con ambas (ilustración 44, anejo 6.4). Este esquema, diseñado a finales de la campaña de vuelos del año 2013, necesita que el disparo de ambas se sincronice para que las capturas se realicen en el mismo instante. Esto nos va a permitir que la textura del

modelo 3D se extraiga de fotografías obtenidas prácticamente desde los mismos puntos de vista. Con ello se consigue que las proyecciones de las plantas sean coincidentes y se puedan realizar correctamente los análisis, fundamentalmente en las plantas de porte superior a 1 metro.

Previo al vuelo se toman los datos de la parcela, se distribuyen las dianas y se toman 8 puntos de control en el 2013 y 6 en el 2014 con la finalidad de georreferenciar los modelos 3D y posteriormente las ortofotos (ilustración 5.14) y (tabla 13, anejo 3).



Ilustración 5.14. Punto de control de la parcela de Soto de Cerrato

5.2.1.2. Sexto vuelo: Sarracín de Aliste (Zamora). Año 2013

Se trata de una parcela vallada situada en el municipio de Sarracín de Aliste en la comarca zamorana de Aliste. La parcela modelada tiene una extensión de 2,53 ha (ver ilustraciones 11 y 12 del anejo 2).

Las especies plantadas son *Prunus avium* (cerezo) y *Juglans regia* (nogal) con un porte pequeño, inferior a los 30 cm en la mayoría de los casos, aunque existe una zona situada al NE de la parcela con clones de cerezo de mucho más porte (alrededor de los 2 metros de altura) (ver ilustración 5.15).

Para este experimento de campo se siguen todas las recomendaciones derivadas de la experiencia anterior, con el fin de intentar conseguir la obtención de una correcta toma de datos. Todas las imágenes de ambos vuelos (IRc y visible/RGB) se obtienen con buenas condiciones de luminosidad y escasa presencia de nubes e intensidad del viento.

La parcela se vuela dos veces por Geobit Consulting con el Microdrone MD4-1000: el primer vuelo a 62 metros con la cámara convencional y el segundo a 60 metros con la modificada (ilustración 41 y 42, anejo 6.2). Muchas de las plantas de la zona NO, O y S, cerezos y nogales, tienen un porte reducido y en muchos casos la escasez, o incluso ausencia de hojas, impide que se refleje información gráfica de las mismas en las fotografías. Es por ello que uno de los aspectos más problemáticos del vuelo va a ser la altura de las pasadas, demasiado elevada en relación al porte de algunas plantas de esta parcela. La altura debería haberse fijado previamente a 50 metros como máximo. El solape mínimo longitudinal se especifica en torno al 70% y el transversal en torno al 40%, tal y como habíamos previsto.

Previo al vuelo se reparten las dianas y se toman 9 puntos de control para obtener las ortofotos georreferenciadas (tabla 13, anejo 3).

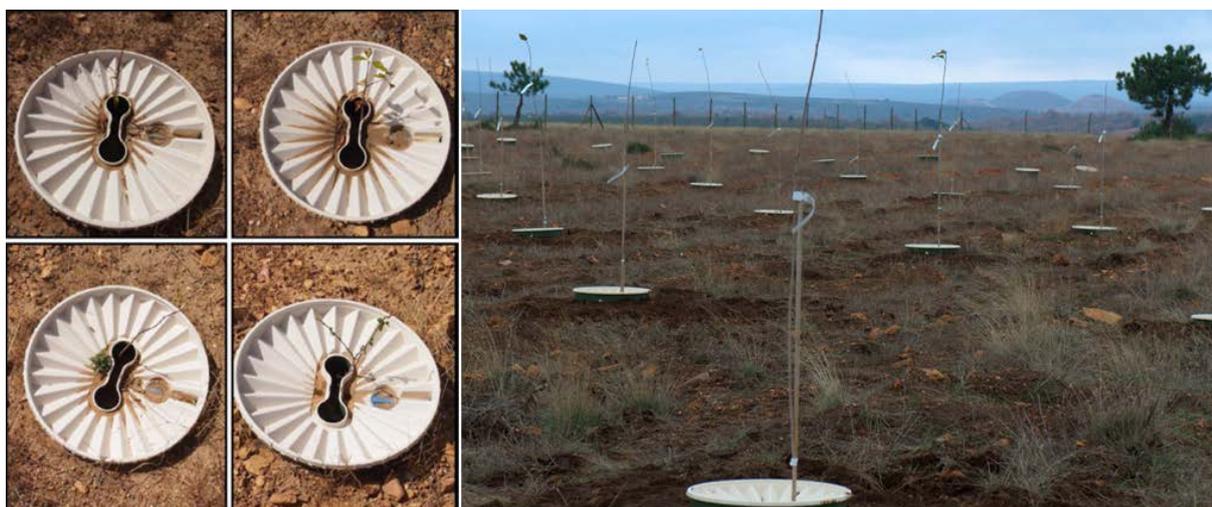


Ilustración 5.15. Parcela de Sarracín. Ejemplos del pequeño porte de algunos plantones (izq) y zona de clones de cerezo de gran porte (der). Año 2013

5.2.1.3. Séptimo y octavo vuelos: Fuensaldaña (Valladolid). Años 2013 y 2014

La parcela se encuentra situada en el término municipal de Fuensaldaña, provincia de Valladolid, en la comarca natural de Montes de Torozos. Es una antigua escombrera que pertenece al ayuntamiento y que se va a restaurar utilizando el Waterboxx como tecnología innovadora (ilustraciones 13, 14 y 15, anejo 2).

La especies plantadas son brinzales de *Pinus halepensis* (pino), *Quercus ilex* (encina) y *Rosa canina* (rosal). Son plantones de porte bajo, no superando los 40 cm en ningún caso. La parcela está muy sucia y llena de cardos, tobas y otras especies invasoras que pueden

dificultar la monitorización como se puede apreciar más abajo en las ilustraciones 5.16 y 5.17.



Ilustración 5.16. Detalle de un plantón de pino en un Waterboxx y rodeado de cardos Año 2013

Se vuela durante dos años por Geobit Consulting S.L. con el Microdrone MD4-1000. En 2013 se vuela en septiembre con buena meteorología. Es la última parcela y ya se puede realizar mediante un único vuelo porque se ha conseguido un gimbal que soporta ambas cámaras. Se modela una superficie de 0.36 ha a una altura media de vuelo de 57 metros (ilustración 43, anejo 6.3).

En 2014 se modelan 0.68 ha a una altura media del vuelo de 51 metros. Los solapes mínimos en los dos años son del 70% en longitudinal y del 40% en transversal (ilustración 45, anejo 6.5).

Se distribuyen uniformemente 6 dianas de las que se van a utilizar 5 como puntos de control en la generación de los modelos 3D georreferenciados (tabla 13, anejo 3).



Ilustración 5.17. Panorámica del estado de la parcela de Fuensaldaña. Año 2013

5.2.1.4. Noveno vuelo: Finca de Matallana 1, Villalba de los Alcores (Valladolid). Año 2014

La finca de Matallana 1 se encuentra enclavada en el municipio de Villalba de los Alcores de la comarca natural de los Montes Torozos y pertenece a la Diputación de Valladolid (ilustraciones 16 y 17, anejo 2). Esta parcela está repoblada con encina micorrizada con trufa blanca *Quercus ilex x Tuber aestivum*. La altura media de los plantones de encina es muy baja, apenas supera los 15 cm y algunos no sobresalen del agujero central (ilustraciones 5.18 y 5.19).



Ilustración 5.18. Detalle de una de las encinas micorrizadas de Matallana 1 en el interior de un Waterboxx.

La parcela se vuela por la empresa Geobit Consulting con el Microdrone MD4-1000 en un único vuelo con gimbal especialmente adaptado para soportar las dos cámaras *mirrorless*. Se vuela una superficie de 1.74 ha, pero se monitorizan únicamente los waterboxx de la finca que suponen una superficie aproximada de 0.90 ha.

Se vuela a una altura media de 61 metros y para la planificación del vuelo se siguen los parámetros indicados, solapes mínimos del 70 % en longitudinal y 40% en transversal (ilustración 45, anejo 6.5). Para gobernar el RPA se utiliza el software propio de la aeronave MdCockpit-Waypoint Editor.

Antes de comenzar el vuelo se reparten 7 dianas de las que se van a utilizar 6 como puntos de control en la georreferenciación de las ortofotos (tabla 13, anejo 3).



Ilustración 5.19. Panorámica de la parcela de Matallana 1. Año 2014

5.2.1.5. Décimo vuelo: San Isidro (Puebla de Lillo, León). Año 2015

La parcela donde se ha efectuado el vuelo pertenece al municipio de Puebla de Lillo en León y se encuentra situada en la estación de esquí de San Isidro que pertenece a la Diputación de León (ilustraciones 18,19, 20 y 21, anejo 2). Las especies plantadas son *Betula pendula* (abedul), *Ilex aquifolium* (acebo), *Juniperus communis* (enebro), *Pinus sylvestris* (pino silvestre), *Pinus uncinata* (pino negro) y *Sorbus aucuparia* (serbal). En algunos casos pueden estar conviviendo incluso dos especies diferentes en el mismo Waterboxx. La altura media no es demasiado elevada, probablemente a causa del clima frío, no superando los 60 centímetros (ilustración 5.20).



Ilustración 5.20. Detalle de un Waterboxx con dos especies (izq) y una marra (der) en San Isidro. Año 2015

La superficie total modelada representada en la ortofoto es de 13.70 Ha, pero únicamente se monitoriza una pequeña parte de ella, aproximadamente 0.50 ha (ilustración 5.21). Se vuela la ladera a una altura media desde el punto de despegue de 110 metros y con los parámetros de solape correctos (ilustración 47, anejo 6.7).

Se realiza un único vuelo por las Universidades de Valladolid y Santiago de Compostela, con el Mikrokopter UFOCAMXXL8 V3, con un nuevo gimbal especialmente diseñado para soportar las dos cámaras Olympus y que ambas disparen en sincronía.

El día no presenta complicaciones meteorológicas. Hace buen tiempo y no hay nubes ni problemas de viento.



Ilustración 5.21. Panorámica de los rodales parcialmente volados en San Isidro. Fuente Proyecto LIFE+ “Los Desiertos Verdes”. Año 2015.

Antes de realizar el vuelo, se reparten 11 dianas pero únicamente 4 se han utilizado para georreferenciar la parcela. Estos puntos de control nos van a servir para la georreferenciación de las ortofotos (tabla 13, anejo 3).

5.2.1.6. Undécimo vuelo: Riofrío de Aliste (Zamora). Año 2015

Se trata de una escombrera de desechos procedentes de la cantera de pizarra a cielo abierto enclavada en el municipio de Riofrío de Aliste, provincia de Zamora y cuya concesión pertenece al ayuntamiento del mismo término municipal (ilustraciones 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28 del anejo 2). La única especie plantada es el *Juniperus communis* (enebro) con una altura media superior a los 60 centímetros.

La superficie total monitorizada no es del total de la escombrera sino de una parte de los bancales que representan una superficie total de 1.94 ha. Los Waterboxx con los enebros están dispuestos en filas a lo largo de algunas de las terrazas abancaladas (ilustración 5.22).

Se realiza un único vuelo (ilustración 5.23) por las Universidades de Valladolid y Santiago de Compostela con el Mikrokopter UFOCAMXXL8 V3 equipado con las dos cámaras *mirrorless*, colocadas en el mismo gimbal y sincronizadas en el disparo. Para la planificación del vuelo

se siguen las normas de solapamiento ya indicadas utilizando el software específico MK-Tool. El vuelo se realiza a una altura media de 78 metros (ilustración 48, anejo 6.8).

Se reparten 12 dianas que sirven de referencia como puntos de control para georreferenciar las ortofotos (ilustración 5.24) y (tabla 13, anejo 3). La meteorología es óptima durante toda la mañana.



Ilustración 5.22. Diferentes vistas de la escombrera de la cantera a cielo abierto de Riofrío de Aliste en 2012 las dos fotografías de abajo y en 2015 las dos de arriba.



Ilustración 5.23. Multirrotor Mikrokopter UFOCAMXXL8 V3 elevándose en Riofrío de Aliste



Ilustración 5.24: Sistema de posicionamiento Global Leica SR530 en Riofrío de Aliste

5.2.1.7. Duodécimo vuelo: Pedrajas de San Esteban (Valladolid). Año 2015

Se trata de una escombrera perteneciente al Ayuntamiento que se pretende restaurar con las siguientes especies: *Retama sphaerocarpa* (retama), *Rosa canina* (rosal), *Quercus ilex* (encina) y *Salix fragilis* (sauce). Se puede observar en la ilustración 5.25 una panorámica de la parcela. La superficie total modelada representada en la ortofoto es de 6.67 ha pero los Waterboxx se encuentran dispersos en una superficie aproximada de 2.5 ha (ver ilustraciones 29 y 30 del anejo 2).

Se vuela por las Universidades de Valladolid y Santiago de Compostela con el Mikrokopter UFOCAMXXL8 V3 (ilustración 5.26). La altura de vuelo media es de 106 metros (ilustración 49, anejo 6.9). Se tomaron 11 puntos de control, pero únicamente se emplearon 9 para georreferenciar las ortofotos (tabla 13, anejo 3).



Ilustración 5.25. Panorámica de la parcela de Pedrajas de San Esteban. Año 2015

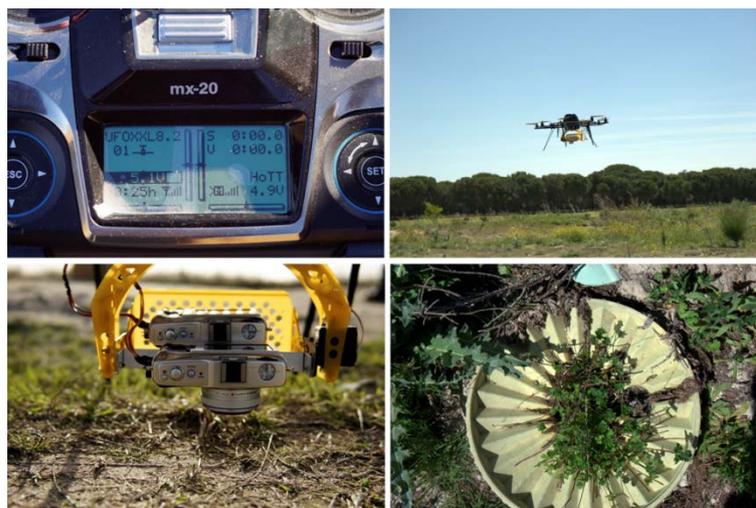


Ilustración 5.26. De izquierda a derecha y de arriba abajo. Emisora, monitoreo de los Waterboxx, soporte de ambas cámaras y un posible falso positivo. Año 2015

5.2.2. Creación de ortofotos georreferenciadas

Las imágenes se pasan al ordenador a través de una tarjeta SD o de un cable con conector USB (son cámaras convencionales). Deben dividirse en dos grupos: visible e IRc. Las fotografías están en formato bruto ORF (formato sin procesar RAW, de las cámaras Olympus) y se deben revelar digitalmente a JPG mediante cualquier programa de tratamiento de imágenes (p.e. Olympus Viewer 2 que es el de la propia marca).

Tras ello, se cargan los JPG en el programa PhotoScan para que éste calcule la orientación externa de las cámaras (su posición relativa en el espacio en el momento de la captura). Así se obtiene la malla de puntos homólogos sobre la cual se genera un modelo 3D aproximado de la superficie.

Con ayuda del modelo 3D se marcan los puntos de control y se ajusta su posición en cada fotografía. Se le adjudican las coordenadas medidas en campo y se optimiza la orientación externa. Posteriormente se genera el modelo 3D definitivo con la mayor densidad de malla posible (calidad "Ultra Alta"). Es importante limitar la densidad de caras de la malla a 10 millones para evitar que se colapse el ordenador. Al finalizar este proceso automático se está en disposición de generar la textura fotorrealista. El programa, también automáticamente, aplica la textura sobre el modelo 3D aplicando las imágenes utilizadas para hacer el modelo, lo que garantiza la exactitud de su colocación. Por último, se exporta la ortofoto georreferenciada.

En resumen, se cargan las fotografías y se ejecutan las rutinas en el siguiente orden de manera semiautomática:

- Carga de imágenes y cálculo del posicionamiento de las cámaras (orientación externa relativa).
- Generación de una malla de paso (modelo 3D simple que se genera a partir de los puntos homólogos que el sistema utiliza para determinar la orientación externa relativa).
- Introducción de los puntos de control con sus coordenadas (orientación externa absoluta).
- Generación del modelo 3D de calidad.
- Creación y exportación de la ortofoto georreferenciada.

Se repite el proceso para cada grupo de imágenes, con lo que se obtendrán dos ortofotos georreferenciadas (visible/RGB e IRc) que debieran solaparse perfectamente, ya que comparten los mismos puntos de control.

5.2.3. Tratamientos digitales

El tratamiento digital seguido es idéntico al explicado en la sección de la multiespectral. Ambas ortofotos se importan a PCI-Geomática y se transporman a formato PIX integrándose los 4 canales (IRc/R/G/B) en un mismo archivo con lo que la información de entrada es idéntica solo que las ortofotos son, a nivel geométrico, de mucha mayor calidad.

5.2.4. Análisis de las imágenes tratadas

El procedimiento de análisis se realiza mediante análisis visual, después de aplicar los diferentes tratamientos digitales expuestos anteriormente. La posibilidad de éxito mejora porque la calidad de las imágenes es muy buena aunque la altura haya sido más elevada.

5.3. CÁMARA COMPACTA RGB Y CÁMARA MULTIESPECTRAL DE UN SENSOR (ADC MICRO) + ALA FIJA (SKYWALKER KIT)

En el año 2015 se incorpora esta nueva tecnología de monitorización que se va a emplear en las parcelas de San Mateo de Gállego, Matallana 2 y La Mudarra.

Consiste en nuevo RPA de ala fija que utiliza dos sensores diferentes que disparan también de forma simultánea: una cámara digital compacta, la Canon A810 y una cámara multiespectral de solamente 90 gr de peso, la ADC Micro.

Utilizar la nueva cámara multiespectral conlleva un diferente método de trabajo que vamos a tratar de explicar con el diagrama de flujo de trabajo empleado, y que aparece en la figura 5.27.

La toma de datos se va a realizar, durante el vuelo, con las dos cámaras, la multiespectral (ADC Micro) y la RGB (Canon A810) montadas bajo los planos del RPA de ala fija. Su disparo se va a sincronizar para que las capturas se realicen en el mismo instante, almacenando también las coordenadas GPS del punto de disparo.

En este caso, la cámara ADC Micro puede trabajar de forma independiente a la RGB, ya que es capaz de captar el IRC, el rojo y el verde, suficientes para analizar los índices de vegetación empleados en este estudio.

El proceso inicial parte del programa de gestión de las imágenes que viene incluido con la cámara, el PixelWrench2 y que, después de efectuar un pre-procesado y un balance de blancos, para mejorar la colorimetría, transforma las imágenes RAW en TIF, formato utilizable para poder generar un ortomosaico por medio del *software* PIX4DMapper.

Las imágenes RGB, en principio, se van a emplear con otra finalidad diferente de esta investigación, relacionada con la generación de modelos de elevación del terreno para vuelos virtuales, dentro del Proyecto LIFE+ “Los Desiertos Verdes”. No obstante la ortofoto en RGB creada con el programa Agisoft PhotoScan a partir del modelo 3D nos va a servir de control en nuestro ortomosaico.

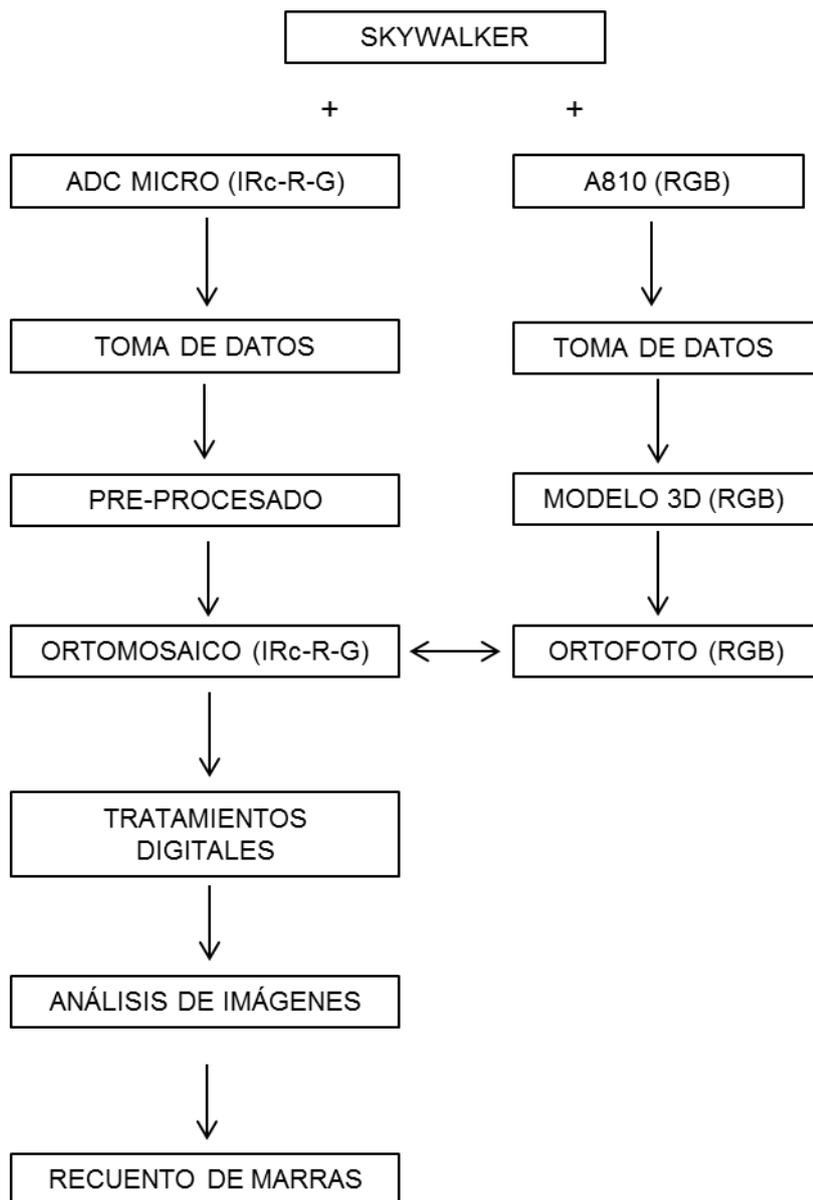


Ilustración 5.27. Diagrama de flujo de la combinación cámara fotográfica RGB y cámara multispectral de un sensor + ala fila (Skywalker kit)

Con la ayuda del programa Pix4DMapper, vamos a generar un ortomosaico georreferenciado en IRc/R/G que no va a tener tanta precisión como una ortoimagen, pero, aunque no es un paso obligatorio, con la ayuda de la ortofoto en RGB se comprueba que el primero presenta un ajuste correcto al segundo con lo que obtenemos un indicativo de calidad. En este caso, el ajuste no debe ser tan fino como en el método anterior (mediante cámaras RGB e IRc), ya que trabajaremos de forma independiente con el ortomosaico. Es decir, no necesitamos dos capas puesto que toda la información necesaria para la detección de marras la capta el sensor multispectral. No obstante, la cámara RGB nos va servir de

control para chequear la calidad del mismo puesto que la orientación externa de imágenes multispectrales con software de fotogrametría suele presentar errores.

Posteriormente se realizan los mismos tratamientos digitales, con la creación de los índices ya descritos en los anteriores métodos y se analizan visualmente las imágenes para intentar determinar las plantas que están vivas y las que están muertas.

5.3.1. Toma de datos de campo

Esta fase es muy importante para que el procedimiento se desarrolle adecuadamente y hay que ser extremadamente cuidadosos en la elaboración del plan de vuelo. Éste se diseña con el software U-See en el propio campo y, a través de la estación de tierra U-Ground, se transmiten los *waypoints* al U-Pilot, que es el autopiloto de la aeronave y corazón del sistema de vuelo. Tras comprobar el *Check-List*, se puede lanzar a mano la aeronave, teniendo en cuenta el punto de aterrizaje y los posibles obstáculos que puedan existir en toda la trayectoria del vuelo y en el hipódromo de aterrizaje. No obstante, en cualquier momento y en caso de necesidad, se puede sobre comandar la aeronave con la emisora Futaba y ordenar la vuelta a casa inmediata.

La altura media de vuelo en un RPA de ala fija de elevado porte, como es el caso del Skywalker, es conveniente que supere los 100 metros, siempre y cuando no existan obstáculos que lo impidan y el solape sea el correcto.

Además es imprescindible, momentos antes de emprender el vuelo, fotografiar con el sensor una plancha de teflón blanco para realizar posteriormente un balance de blancos con el programa PixelWrench2.

5.3.1.1. Décimo tercero vuelo: San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2015

El vuelo se realizó con el Skywalker Kit (ilustración 5.28), por las Universidades de Valladolid y Santiago de Compostela con las dos cámaras (multispectral, Tetracam ADC Micro y RGB, Canon A-810), siguiendo el método especificado en el apartado 5.3.

Las plantas monitorizadas de San Mateo, pinos y acacias, han crecido mucho desde la experiencia de 2012 y algunas alcanzan medidas extraordinarias. En el caso de las acacias hay ejemplares que superan los 2.5 metros, pero en los pinos la altura es menor (alrededor de 1.2 metros). Los Waterboxx quedan muy relegados y ya desde el aire, únicamente se distinguen las plantas (ilustración 5.29).

La superficie total modelada representada en la ortofoto es de 18 ha, pero sólo se monitoriza una pequeña parte de aproximadamente 0.30 ha en la zona de pinos situada al este y nombrada con la letra C (ver ilustraciones 4, 5, 6, 7 y 8 del anejo 2). La altura de vuelo media es de 126 metros y el solape mínimo lo fijamos en un 70% longitudinal y 40% transversal (ilustraciones 50 y 51, anejo 6.10). Previo al vuelo se reparten 11 dianas que nos van servir como puntos de control.



Ilustración 5.28. El Skywalker esperando el momento del despegue



Ilustración 5.29. Acacias y pinos de las parcelas de San Mateo de Gállego. Año 2015

5.3.1.2. Décimo cuarto y décimo quinto vuelos: Finca de Matallana 2 en Villalba de los Alcores y La Mudarra (Valladolid). Año 2015

Al igual que la parcela de San Mateo, las parcelas de Matallana 2 (ilustraciones 31, 32, 33 y 34, anejo 2) y La Mudarra (Ilustraciones 35, 36 y 37, anejo 2) se volaron con el RPA de ala fija Skywalker Kit.

En la parcela de Matallana 2 (ilustraciones 35, 36, 37 y 38, anejo 2) se utilizó el modelo 210 WB con especies de *Pinus halepensis* (pino) y *Quercus ilex* (encina), (ilustración 5.30) y en la de La Mudarra se empleó el nuevo prototipo de cartón descrito en el apartado 1.2.1 con las mismas especies que en Matallana 2.

Las figuras 5.30 y 5.31 muestran imágenes fotográficas de cada una de las dos plantaciones.



Ilustración 5.30. Detalle de la disposición de los Waterboxx en Matallana 2. Año 2015



Ilustración 5.31. Altura (izquierda) y perspectiva de la colocación (derecha) de los plantones de pino en Waterboxx de cartón en la parcela de La Mudarra. Año 2015

Las características del vuelo en ambos casos, con alturas de más de 200 metros debido fundamentalmente a la existencia de obstáculos fijos, como tendido eléctrico, torres de alta tensión o montículos imposibilitan la generación de los ortomosaicos para realizar el estudio de marras (ilustración 52, anejo 6.11).

Esto se debe principalmente al tamaño del píxel sobre el terreno, cercano a los 6.5 cm (debido en parte a la baja resolución de la cámara multiespectral), que permite apreciar la posición del Waterboxx pero no la vegetación (inferior a 30 cm) presente en su interior.

5.3.2. Pre-procesado y generación de ortomosaicos

El pre-procesado consiste en la elección de las fotografías válidas, sin problemas de enfoque y no movidas, y su conversión en archivos en formato TIF partiendo del formato RAW (mediante el programa PixelWrench2), realizando un balance de blancos para obtener una correcta colorimetría. Posteriormente se generan los ortomosaicos con el *software* PIX4DMapper, que toma los puntos de control corregidos diferencialmente con el software SKI-Pro GPS y la red GNSS del ITACYL. Es conveniente, aunque no necesario, su posterior validación mediante la ortofoto generada por el programa Agisoft PhotoScan (para ello se utilizan las imágenes obtenidas en el mismo vuelo con la cámara RGB).

El paso final consiste en la generación de la ortofoto y para ello se procede a generar el modelo 3D siguiendo los mismos pasos explicados en el apartado 5.2.2.

5.3.3. Tratamientos digitales

Los tratamientos digitales que se van a utilizar son los mismos que en los otros dos métodos ya descritos. Tras generar el archivo PIX a partir del ortomosaico con el software PCI-Geomática, se determinan con este programa los índices Green NDVI y ACP (Análisis de Componentes Principales).

5.3.4. Análisis de las imágenes tratadas

Posteriormente se analizan las imágenes de modo visual y comparando diferentes tratamientos se van diferenciando las plantas vivas de las marras.

5.4. RESUMEN FINAL DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

En la tabla 5.2, que figura a continuación, se han agrupado, a modo de resumen, los tres métodos empleados en los diferentes experimentos realizados en los últimos cinco años en función de la combinación sensor + aeronave empleados:

- Cámara multiespectral de 6 canales (Tetracam Mini MCA-6 digital) + multirrotor
- Cámara fotográfica convencional y modificada (Olympus PEN E-P1) + multirrotor
- Cámara compacta RGB y cámara multiespectral de un sensor (ADC Micro) + ala fija (Skywalker kit)

En dicha tabla se especifica el año en que se voló la parcela, el término municipal a la que pertenece, el RPA y cámara utilizada y el software propio de cada proceso. Además, figura la causa de cambio y diferencia o avance tecnológico a modo de conclusión.

En color rosa pálido figuran los tres experimentos realizados con la Tetracam Mini MCA-6. Este método se abandonó por los serios problemas que tuvimos en la calidad de imágenes obtenidas, debida a la trepidación provocada por el tipo de sensor y las vibraciones del multirrotor y por la falta de operatividad en la aplicación del flujo de trabajo.

En color azul pálido figuran los 9 ensayos que realizamos con la doble cámara y que dieron una buena calidad de imagen debido a su gran resolución y disparo instantáneo. El mayor problema de la utilización de este método es la falta de autonomía del multirrotor empleado que le hace poco eficiente a la hora de supervisar plantaciones en parcelas grandes.

En último lugar y de color gris claro aparecen los tres ensayos realizados con el Skywalker kit, que puede tener un buen aprovechamiento en parcelas de mucha extensión debido a su elevada autonomía pero que necesita una cámara multiespectral de mayor resolución en la caso de monitorizar plantas de pequeño tamaño o escaso vigor vegetal. Sin embargo, para plantas de gran altura su eficacia es muy elevada.

Tabla 5.2. Resumen de los tres diferentes métodos empleados en el proceso de investigación

AÑO DE VUELO	T.M.	RPA	SENSOR	MÉTODO	SOFTWARE				CAUSA DE CAMBIO. DIFERENCIA/AVANCE TECNOLÓGICO
					PREPROCESADO	GEORREFERENCIACIÓN	MOSAICADO	TRATAMIENTOS DIGITALES	
2011	VILLARRAMIEL	MD4-1000	MINI MCA-6	SENSOR MULTISPECTRAL DE 6 CANALES	PixelWrench 2	SKI-Pro GPS	ArcGIS 9.2	PCI-Geomática v10	Problemas técnicos del sensor y efecto "rolling-shutter" provocan multitud de imágenes no válidas. Método tedioso y poco operativo en parcelas grandes.
2012	SAN MATEO DE GALLEGO	Okto XL					Kolor Autopano PRO	Se abandona la metodología	
2013	SOTO DE CERRATO	MD4-1000							
2013	SOTO DE CERRATO								Sensor adecuado para proporcionar ortomágenes correctas para el tratamiento digital posterior. Método operativo y funcional para conteo de maras en parcelas medianas.
2014	SARRACÍN DE ALISTE								
2013	FUENSALDAÑA	MD4-1000		CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL					
2014	MATALLANA 1		PEN E-P1						
2014	SAN ISIDRO								
2015	RIFRÍO DE ALISTE	UFOCAMXXL8 V3							
2015	PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN								
2015	SAN MATEO DE GALLEGO		ADC MICRO	COMPACTA RGB + SENSOR DE UN CANAL ÚNICO					
2015	MATALLANA 2	SKYWALKER							
2015	LA MUDARRA								

**P
A
R
T
E

III**

RESULTADOS



CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



6.1. RESULTADOS CON CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES (TETRACAM MINI MCA-6 DIGITAL) + MULTIRROTOR

6.1.1. Resultados del primer vuelo en Villarramiel (Palencia). Año 2011

Una vez realizado el vuelo en la parcela de Villarramiel (Palencia), la empresa Cartogalicia nos envió un archivo con todas las imágenes obtenidas y una tabla con las características de toma de cada una de ellas: coordenadas de geoposicionamiento del centro de cada imagen, inclinación, guiñada, alabeo y cabeceo del Microdrone (ver tabla 14, anejo 4). Una vez almacenadas las imágenes RAW en 6 carpetas, se procede a la obtención de los mosaicos.

Como consecuencia de las malas condiciones meteorológicas descritas en el apartado 5.1.1.2, nos encontramos con la baja calidad en el recubrimiento de una gran parte de las imágenes lo que provoca que el mosaico en cada vuelo quede incompleto (Ilustración 6.1). Además, existen diferencias entre la altura nominal prevista: 10, 15 y 20 metros y la realmente obtenida: 13.7, 18 y 22.5, por problemas de precisión en el sistema GPS de la aeronave. Puesto que los plantones son algo más bajos de lo previsto, la altura de vuelo puede ser factor limitante para la identificación de marras.

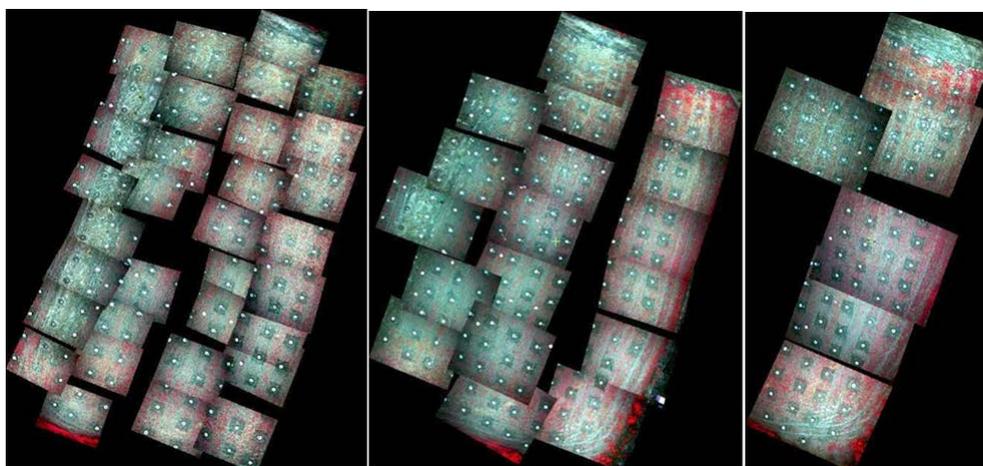


Ilustración 6.1. Mosaico completo en infrarrojo color de las imágenes a 13.7, 18 y 22.5 metros (de izquierda a derecha)

Estos problemas nos van a limitar el área de la zona de estudio y, para poder comparar los resultados, nos vamos a centrar en la zona común de los tres vuelos que se refleja en la Ilustración 6.2. Aquí se puede observar que tenemos tres filas de Waterboxx, la primera con plantones de *Castanea sativa* (castaño), la segunda con *Pinus pinaster* (pino), la tercera de

Quercus ilex (encina) y tres marras aisladas, dos de pino y una de *Cupressus sempervirens* (ciprés).

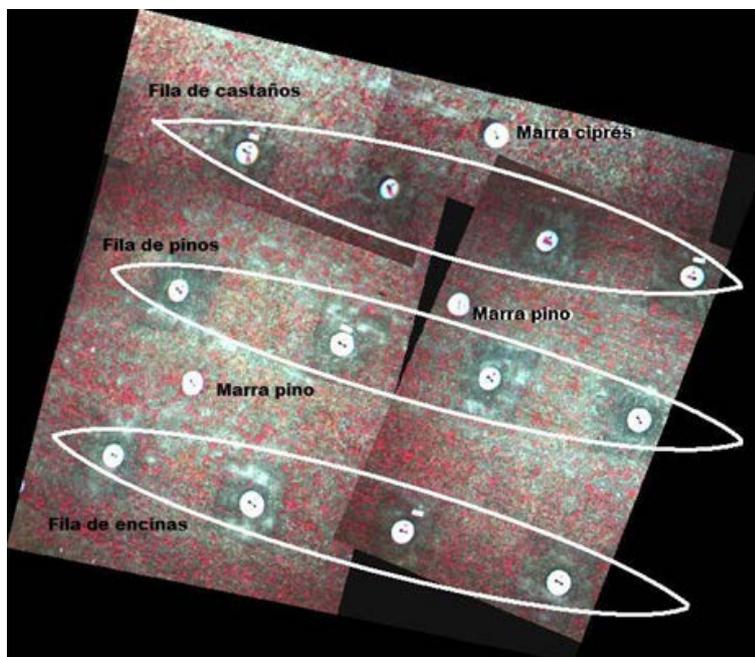


Ilustración 6.2. Zona común de estudio en los tres mosaicos del vuelo a menor altura (13.7 metros)

Una vez obtenidos los tres mosaicos comunes a los tres vuelos (13.7, 18 y 22.5 metros) se procedió a realizar el tratamiento digital de las imágenes: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), Green NDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) y ACP (*Análisis de Componentes Principales*). Con la aplicación de estos tratamientos se busca realzar la respuesta espectral de las zonas con vegetación viva. Las marras son plantones muertos que deberían de tener otra respuesta espectral o no tener la misma que la vegetación sana.

En los siguientes apartados vamos a comparar y analizar los resultados de los tres mosaicos para identificar, en la medida de lo posible, cada especie y si los plantones están vivos o muertos. Una vez analizados estos resultados en los tres vuelos podremos aplicar las conclusiones en la parte jalonada de la parcela que representa una superficie aproximada de 0.12 ha.

6.1.1.1. Identificación de plantones vivos en *Castanea Sativa* y *Betula Pendula*

En el caso de los plantones de las especies *Castanea sativa* (castaño) y *Betula pendula* (abedul), que tienen unas hojas amplias y bien desarrolladas los resultados son óptimos para las cuatro técnicas de tratamiento, pudiéndose distinguir perfectamente la vegetación viva del Waterboxx en todas ellas. El abedul es una especie de gran vigor que aunque no se encuentra representada en la zona común, porque sólo tenemos imágenes de dos de los tres vuelos, existe en la parte jalonada y por ese motivo también se va a monitorizar.

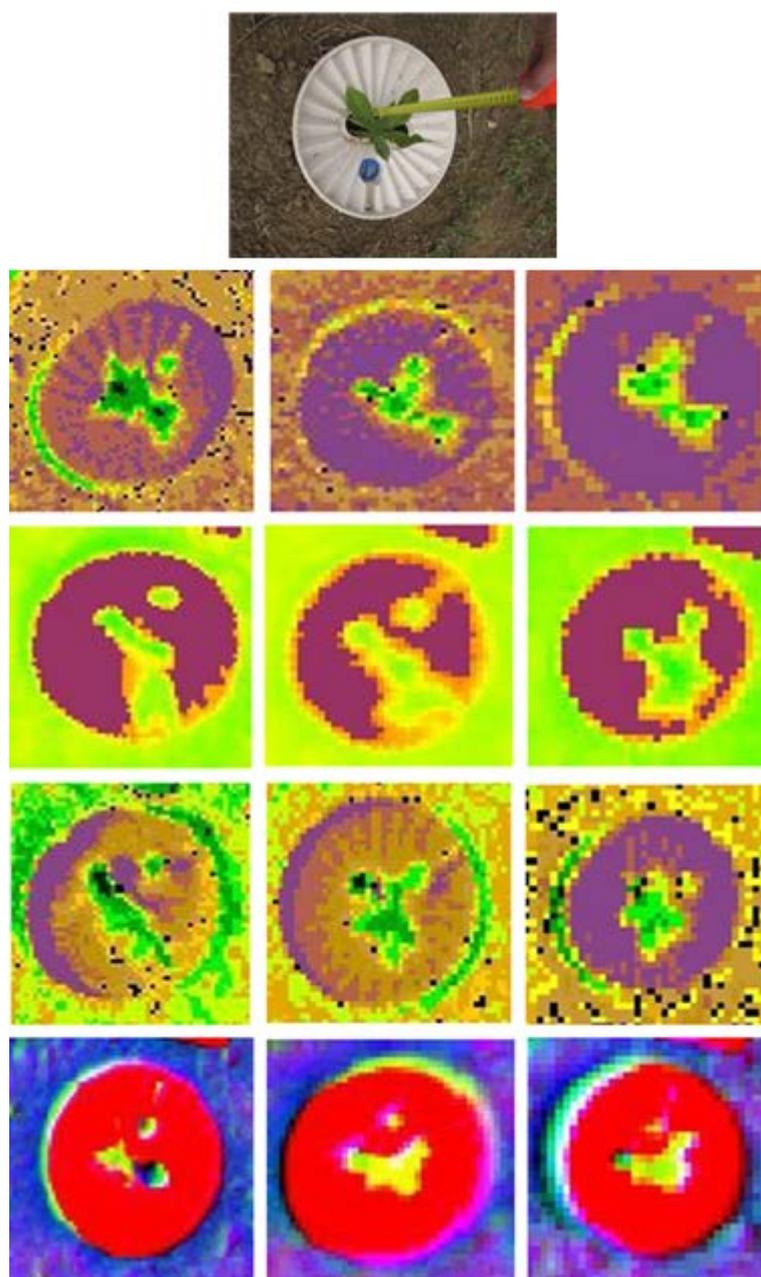


Ilustración 6.3. Planta de castaño. De arriba hacia abajo: NDVI, SAVI, Green NDVI y ACP y de izquierda a derecha vuelos a 13.7, 18 y 22.5 m

En la Ilustración 6.3, la primera fila se corresponde con la fotografía en RGB de un plantón de castaño. La segunda fila con tres imágenes de los tres vuelos (de izquierda a derecha 13.7, 18 y 22.5 metros) en pseudocolor del índice NDVI. El color verde oscuro responde a la vegetación vigorosa siendo más claro cuanto menos vegetación exista, llegando al color marrón claro que define el suelo desnudo. Los Waterboxx quedan en color violeta. En la segunda fila aparece la imagen en pseudocolor para el índice SAVI. En esa fila se puede observar que en los tres vuelos queda perfectamente definido su comportamiento espectral en verde con tonos amarillos en cualquiera de las diferentes alturas de vuelo. La tercera fila se refiere al índice Green NDVI. La respuesta espectral se visualiza en color verde claro e intenso en cualquiera de las tres imágenes. En la cuarta y última fila, que se corresponde con el ACP, observamos los Waterboxx en color rojo y la vegetación viva en verde y amarillo (dependiendo de la respuesta espectral). El suelo se visualiza en violeta para la tierra seca y en azul para la tierra más húmeda.

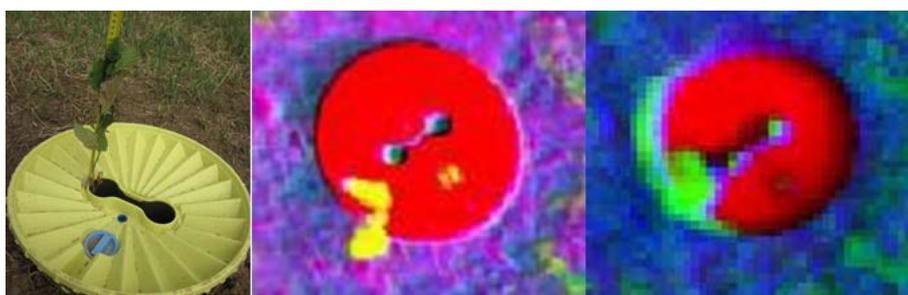


Ilustración 6.4. Planta de abedul. En imágenes de los vuelos a 13.7 m (centro) y 22.5 m (derecha). Se aprecia claramente su vigor vegetal

En la Ilustración 6.4, podemos observar el tratamiento con ACP de los dos vuelos en los que tenemos imágenes del abedul. En la figura se aprecia claramente el vigor de la planta.

EL ACP crea bandas artificiales a partir de las originales con la máxima cantidad de información. Para nuestro estudio los componentes más interesantes se centran en los que muestran mejor valoración del vigor vegetal. A modo de ejemplo, los informes generados en el vuelo a 13.7 metros aparecen en las tablas 6.1, 6.2 y 6.3. En la tabla 6.2 podemos observar que, según los porcentajes, el componente principal abarca casi toda la información de la banda original.

Tabla 6.1. Matriz de varianza-covarianza para los 3 canales del mosaico

	1	2	3
1	591291		
2	645098	809932	
3	480510	611340	502537

Tabla 6.2. Autovalores y varianzas asociadas a cada componente

	Autovalor	Desviación	% Varianza
1CP	18151206	426042	0.9534
2CP	680222	82476	0.0357
3CP	206174	45406	0.0108

Tabla 6.3. Matriz de autovectores que muestran la asociación de cada CP a cada una de las bandas originales

	1CP	2CP	3CP
1	0.54921	0.66237	0.50955
2	0.78753	-0.20622	-0.58075
3	-0.27959	0.72024	-0.63489

Lo mismo ocurre en los demás vuelos, el primer componente principal es el que más información retiene de la información original, aunque son valores casi idénticos pues apenas existe una pequeña variación de la altura en ellos.

Así pues, podemos concluir que con cualquiera de los tratamientos apuntados, los resultados para el castaño son óptimos puesto que se puede apreciar perfectamente el vigor vegetal de las plantas vivas.

6.1.1.2. Identificación de plantones vivos en *Pinus pinaster* y *Quercus ilex*

En el caso de *Pinus pinaster* y *Quercus ilex*, la confusión entre el plantón y la tapa inferior del Waterboxx es grande, ya que se produce una mayor respuesta espectral en ese rango de longitud de onda similar.

Estos plantones, fundamentalmente en el caso del pino, son demasiado jóvenes, y apenas llegan a sobresalir por el orificio central del Waterboxx y, en muchos casos, o lo hacen levemente, o no lo consiguen quedando resguardados en su interior (Ilustración 6.5). Además, la planta únicamente está en uno de los dos agujeros centrales, por lo que en ningún caso debe de aparecer la misma respuesta espectral en ambos orificios.



Ilustración 6.5. Plantones de *Pinus pinaster* (izquierda) y *Quercus ilex* (derecha) en sendos Waterboxx

Tras realizar los tratamientos digitales pasamos a realizar el análisis visual de los resultados.

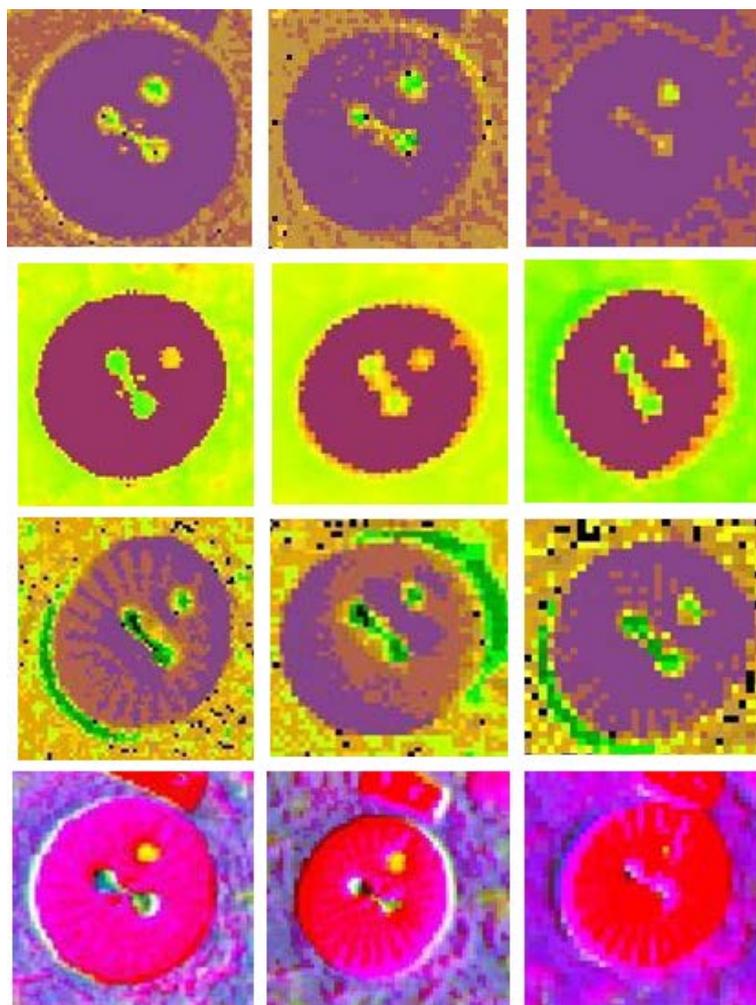


Ilustración 6.6. Planta de pino. De arriba hacia abajo: NDVI, SAVI, Green NDVI y ACP y de izquierda a derecha vuelos a 13.7, 18 y 22.5 m

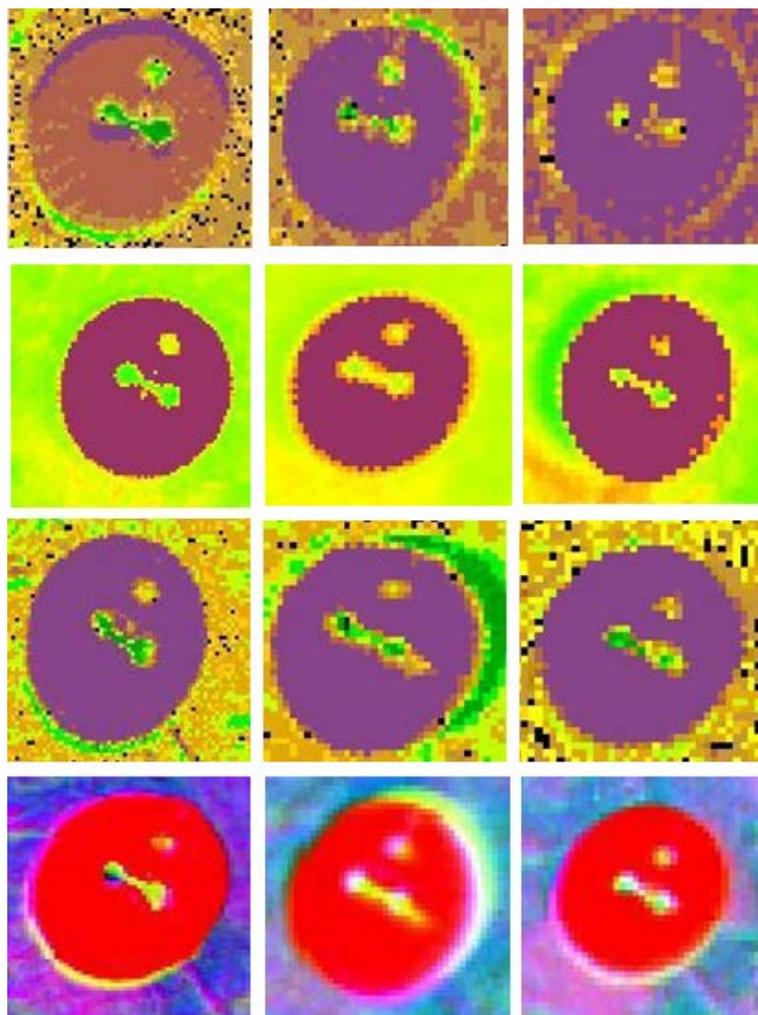


Ilustración 6.7. Planta de encina. De arriba hacia abajo: NDVI, SAVI, Green NDVI y ACP y de izquierda a derecha vuelos a 13.7, 18 y 22.5 m

En las ilustraciones 6.6 y 6.7 podemos observar que en la primera fila, que se corresponde con el índice NDVI a 13.7 metros en ambos casos, no se logra diferenciar a los propios plantones del orificio central del Waterboxx. Obviamente si no somos capaces de diferenciarlos a baja altura, a mayores alturas los resultados son aún menos claros. En el caso de la segunda fila, en la que visualiza el índice SAVI, tenemos el mismo problema que en el caso anterior. El agujero central de los Waterboxx muestra la misma reflectividad que debería de mostrar la vegetación sana, lo que nos impide la visualización del plantón. Para la tercera fila, que corresponde al índice Green NDVI la confusión entre plantón y la tapa inferior del Waterboxx es máxima, ya que se produce una mayor respuesta espectral en ese rango de longitud de onda similar. La última fila, que representa el ACP, es la que tiene más posibilidades de identificar plantas vivas. Para el pino es muy difícil pero para la encina tenemos un porcentaje razonable de éxito en la estimación de plantas vivas a 13.7 metros.

La causa principal es que la altura de la planta de encina es mayor que la de pino. Otra posible causa puede ser la inclinación del sensor en el momento de la toma.

Así podemos concluir que, para el caso de la encina y el pino, es muy difícil distinguir si las plantas están vivas porque en los orificios centrales donde está situado el plantón, o bien no se distingue nada, o bien se confunden ambos agujeros dando la impresión de la existencia de vegetación sana. Por este motivo, para estas dos especies, nos vamos a centrar en la detección de marras. Si somos capaces de detectar las plantas muertas, podemos deducir que las demás están vivas.

6.1.1.3. Identificación de marras en cualquiera de las especies

Cuando hay una marra en cualquiera de las especies, esta es deducida por ausencia de vigor vegetal en el interior del Waterboxx (Gil et al., 2013).

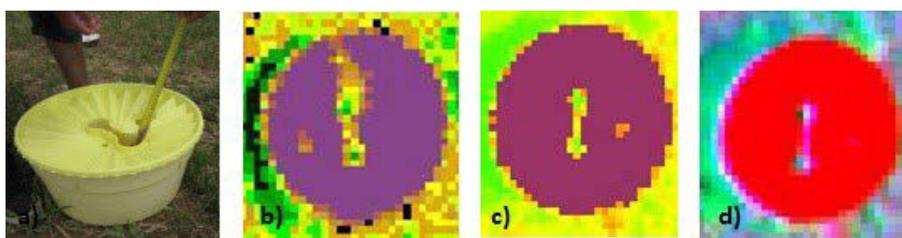


Ilustración 6.8. Ejemplo de marra a 22.5 m analizado mediante los índices b) GNDVI, c) SAVI y d) ACP. Tomado de Gil, et al., 2013

En la Ilustración 6.8, se deduce que el tratamiento que más ventajas presenta para la identificación de marras es el ACP ya que se minimiza la posibilidad de confusión entre planta viva y muerta. Las marras dependiendo de su vigorosidad aparecen con este tratamiento en colores azul o rosa claro. No obstante para valorar si somos capaces de mejorar la identificación, decidimos aplicar a las imágenes un filtro de paso alto. Los filtros de paso alto refuerzan el contraste en la imagen, de este modo podemos incrementar la diferencia existente entre el Waterboxx y el terreno. Elegimos el filtro Sobel porque aporta mejoras en la detección de bordes. Una de las características más importantes que ofrece la aplicación de este filtro es el realce que presentan las marras en comparación con las distintas cubiertas de tal forma que éstas aparecen mucho más atenuadas.

En la Ilustración 6.9, aplicando el filtro Sobel a la imagen ACP del vuelo a más baja altura, se muestra la detección de marras en azul como se puede ver en el pino (e) y el ciprés (f) y, sin embargo, atenúa la respuesta espectral de la vegetación viva (castaño) (d).

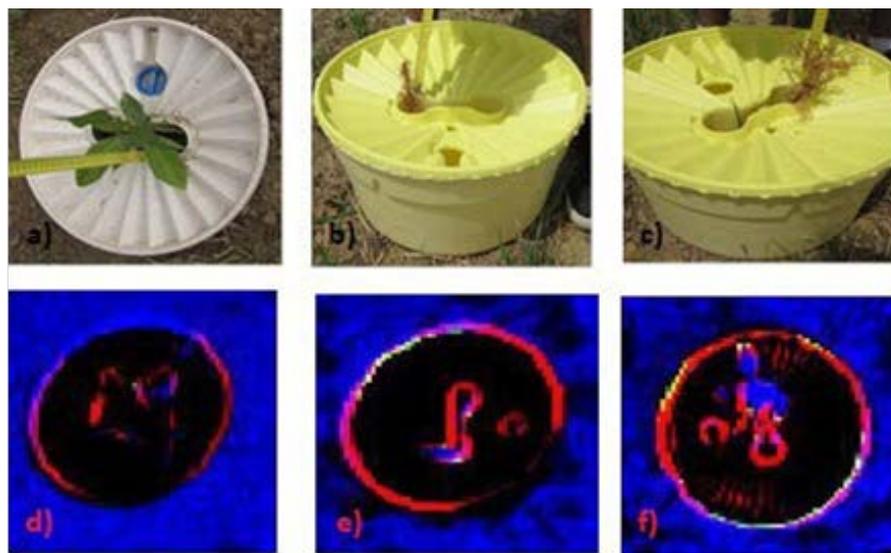


Ilustración 6.9. Detalle de los Waterboxx con el filtro Sobel aplicado a la imagen ACP del vuelo de 13.7 metros de altura en planta viva de castaño (d) en marra de pino (e) y en marra de ciprés (f). Tomado de Gil, et al., 2013

6.1.1.4. Cálculo de la exactitud en la detección de marras mediante teledetección

Una vez aplicados los cuatro tratamientos digitales, realizamos la identificación de las plantas vivas y de las marras en los Waterboxx dentro del área determinada por los jalones (aproximadamente 30 x 40 metros, 157 plantones).

Se adopta como criterio de análisis para la encina y el castaño, la identificación del plantón vivo dando por supuesto que aquello que no es identificable es una marra. Por el contrario, para el pino y ciprés se identifican las marras y el resto se da por supuesto que es plantón vivo.

Realizamos el estudio en base a la imagen resultante del ACP para la detección de los plantones vivos. Para la detección de marras nos centramos en la aplicación del filtro de paso alto Sobel sobre la misma imagen. El ACP es el tratamiento con el que hemos obtenido resultados más exitosos en la identificación de plantas vivas (no para el castaño que es apreciable perfectamente con cualquier tratamiento, sino fundamentalmente para el resto de las especies).

Para determinar la exactitud de los datos obtenidos mediante tratamiento digital se procede a calcular la matriz de confusión correspondiente para cada especie (ver tablas 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7). Posteriormente se obtiene el índice de Exactitud Global de la clasificación calculado como el nº total de aciertos con respecto al total de plantones analizados. De esta manera, se contrastan los datos determinados por teledetección con la verdad terreno.

Con este método y aplicando dicho criterio se alcanza una Exactitud Global (número total de aciertos / total) para el castaño del 94% (32/34), para el pino del 95% (43/45), para la encina del 84% (49/58) y para el abedul del 89% (16/18). En el ciprés las 2 marras fueron detectadas sin dificultad 100% (2/2). La Exactitud Global de todas las especies en conjunto fue del 90.3% (140/155).

Tabla 6.4. Matriz de confusión aplicada al castaño

		VERDAD TERRENO				
		Plantón vivo	Marra	Total	Error usuario (%)	Error comisión (%)
IMAGEN	Plantón vivo	31	1	32	96.88	3.12
	Marra	1	1	2	50.00	50.00
	Total	32	2	34		
	Error productor (%)	96.88	50.00			
	Error omisión (%)	3.12	50.00			

Tabla 6.5. Matriz de confusión aplicada al pino

		VERDAD TERRENO				
		Plantón vivo	Marra	Total	Error usuario (%)	Error comisión (%)
IMAGEN	Plantón vivo	35	1	36	97.22	2.78
	Marra	1	8	9	88.89	11.11
	Total	36	9	45		
	Error productor (%)	97.22	88.89			
	Error omisión (%)	2.78	11.11			

Tabla 6.6. Matriz de confusión aplicada a la encina

		VERDAD TERRENO				
		Plantón vivo	Marra	Total	Error usuario (%)	Error comisión (%)
IMAGEN	Plantón vivo	45	7	52	86.54	13.46
	Marra	2	4	6	66.67	33.33
	Total	47	11	58		
	Error productor (%)	95.74	36.36			
	Error omisión (%)	4.26	63.64			

Tabla 6.7. Matriz de confusión aplicada al abedul

		VERDAD TERRENO				
		Plantón vivo	Marra	Total	Error usuario (%)	Error comisión (%)
IMAGEN	Plantón vivo	16	2	18	88.88	11.11
	Marra	0	0	0		
	Total	16	2	18		
	Error productor (%)	100.00	0			
	Error omisión (%)	0.00	100.00			

6.1.2. Resultados del segundo vuelo en San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2012

Una vez realizado el vuelo, la empresa Fotocopter nos remite un archivo de vuelo con las 262 imágenes adquiridas a una altura de vuelo de 15 metros.

Procedemos, en primer lugar, a componer el mosaico y a definir la zona de estudio sobre la que vamos a realizar los mismos cuatro tratamientos digitales ya experimentados en Villarramiel. Esta zona elegida la podemos visualizar en la Ilustración 6.10 y los tratamientos digitales, realizados en ella, en las siguientes ilustraciones (6.11, 6.12, 6.13 y 6.14)

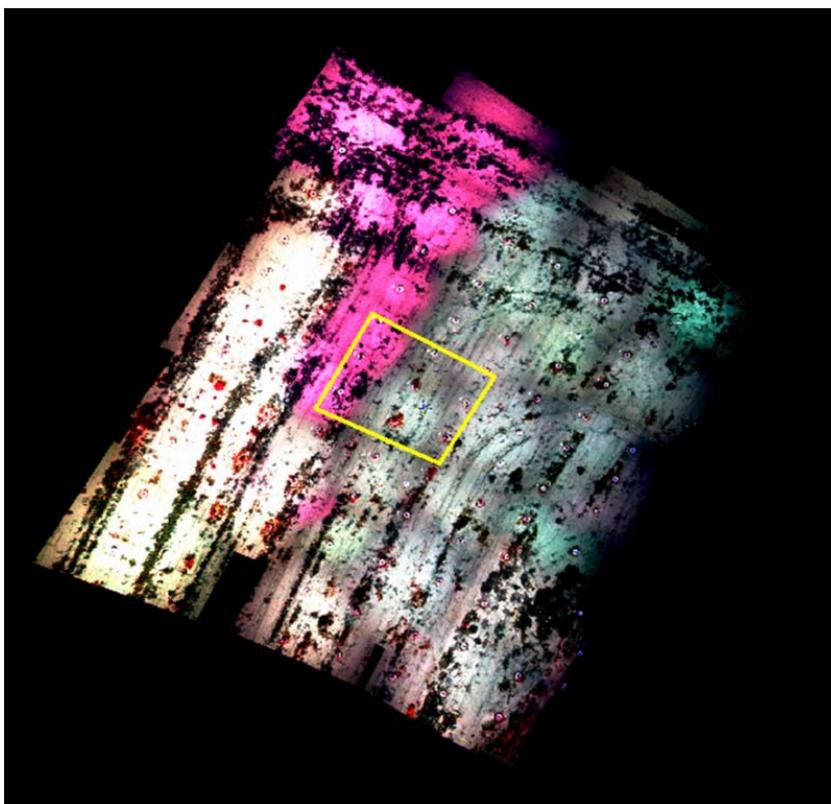


Ilustración 6.10. Zona común de estudio para visualizar los resultados en infrarrojo color

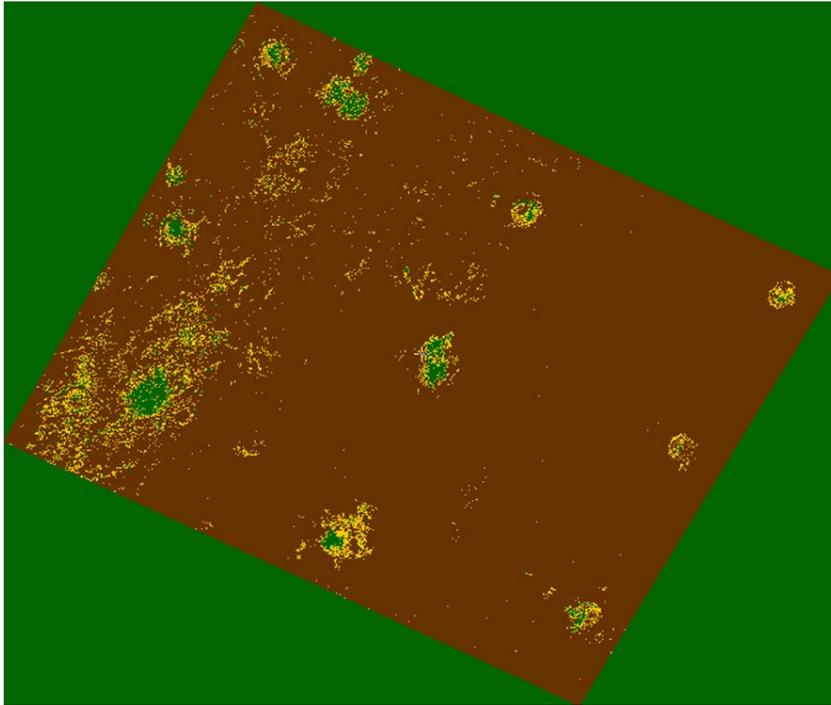


Ilustración 6.11. Índice NDVI en pseudocolor de la zona de estudio

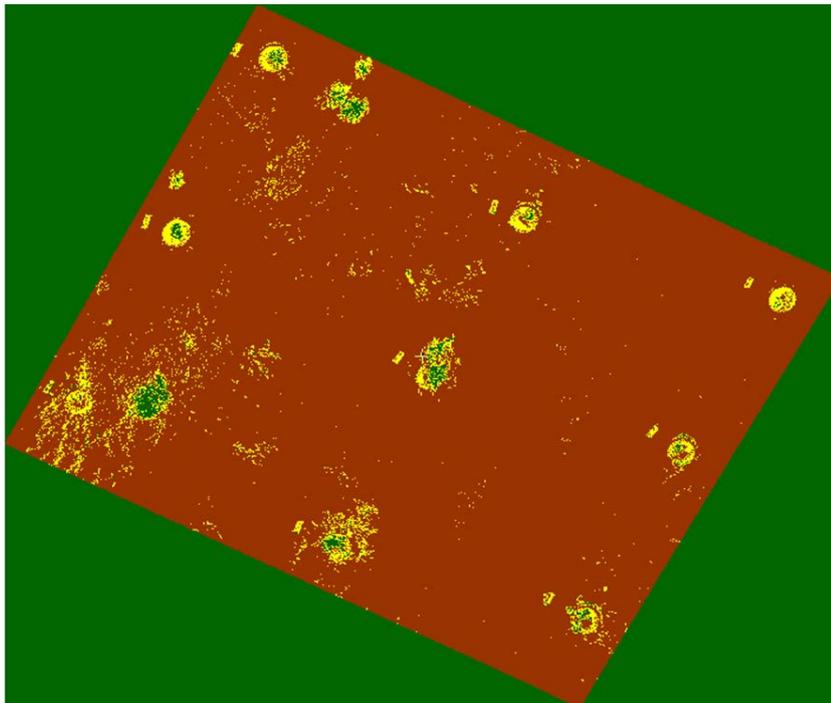


Ilustración 6.12. Índice Green NDVI en pseudocolor de la zona de estudio

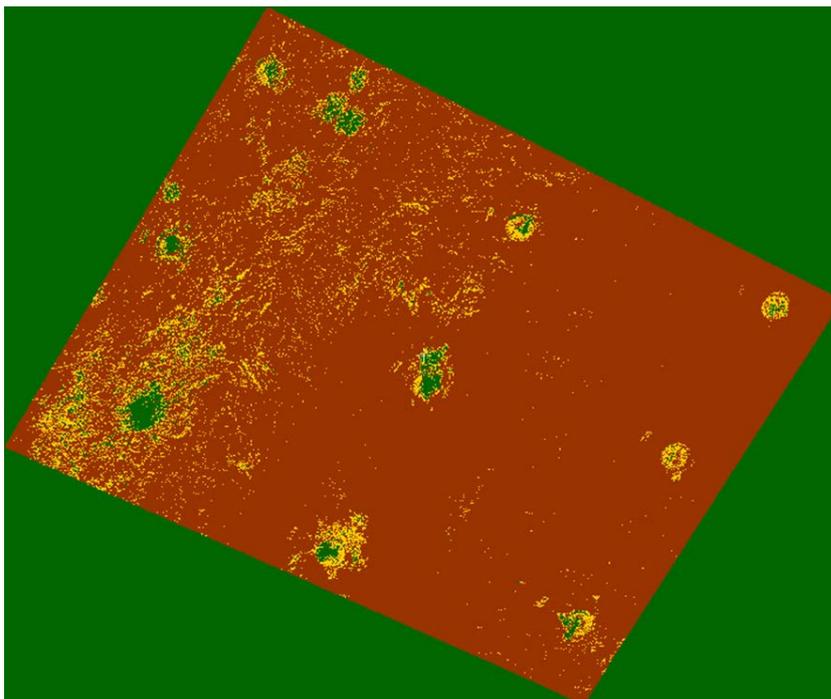


Ilustración 6.13. Índice SAVI en pseudocolor de la zona de estudio

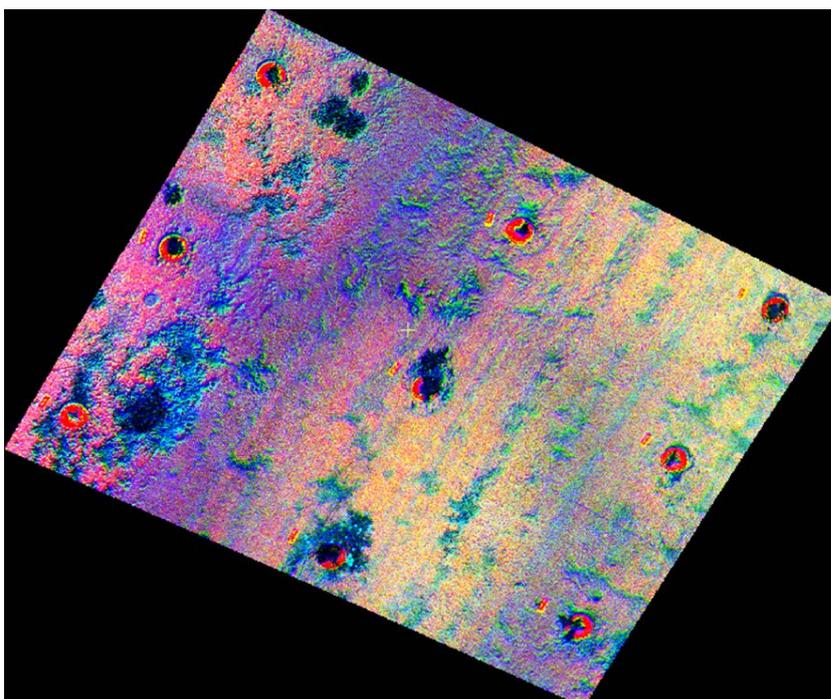


Ilustración 6.14. Recorte del ACP de la zona de estudio

El tratamiento digital del ACP crea, a partir de bandas originales con mayor información, otras artificiales que muestran los componentes de más interés, en este caso el referido a la vegetación. Las tablas 6.8, 6.9 y 6.10 muestran los resultados obtenidos al realizar el ACP

para el mosaico. En la tabla 6.9 se puede comprobar mediante los porcentajes que el primer canal abarca casi toda la información.

Tabla 6.8. Matriz de varianza-covarianza para los canales del mosaico. Vuelo a 15 metros

1	2	3	4	5	6
770.851					
508.525	361.935				
676.753	461.217	648.37			
770.851	508.525	676.753	770.851		
508.525	361.935	461.217	508.525	361.935	
676.753	461.217	648.37	676.753	461.217	648.37

Tabla 6.9. Autovalores y varianzas asociadas a cada canal. Vuelo a 15 metros

	Autovalor	Desviación	%Varianza
1	3465.8179	58.8712	97.29%
2	60.986	7.8094	1.71%
3	35.5098	5.959	1.00%
4	-0.0001	0.0096	0.00%
5	0.0001	0.0073	0.00%
6	0	0.0014	0.00%

Tabla 6.10. Matriz de autovectores propios de la matriz de covarianza. Vuelo a 15 metros

	1	2	3	4	5	6
1	0.4671	0.31661	0.42612	0.4671	0.31661	0.42612
2	0.42761	0.11195	-0.55192	0.42761	0.11195	-0.55192
3	0.31459	-0.62228	0.11751	0.31459	-0.62227	0.11751
4	-0.02142	-0.69874	0.10631	0.02142	0.69874	-0.10631
5	0.12541	-0.10843	-0.6874	-0.12541	0.10843	0.6874
6	-0.69557	0.00197	-0.12722	0.69557	-0.00197	0.12722

6.1.2.1. Identificación de plantones vivos en *Robinia pseudoacacia*

Una vez realizados todos los tratamientos digitales, realizamos un análisis visual comparativo a partir de la imagen de cada tratamiento.

En la Ilustración 6.15, se puede comprobar un recorte de la imagen de un Waterboxx con los tratamientos digitales NDVI, SAVI y ACP, realizados del vuelo a 15 m, que nos va a permitir la identificación de plantas vivas y el vigor vegetal. Sin embargo, en el caso del Green NDVI se dificulta mucho esta tarea. También se puede apreciar que es en el ACP donde los resultados son más claros. En este tratamiento se observan los Waterboxx en color rojo, la vegetación viva en tonos verdes y azules, y el suelo en tonos amarillos y rosáceos. Los orificios del Waterboxx tienen el mismo tono que la vegetación y por este motivo inducen a confusión.

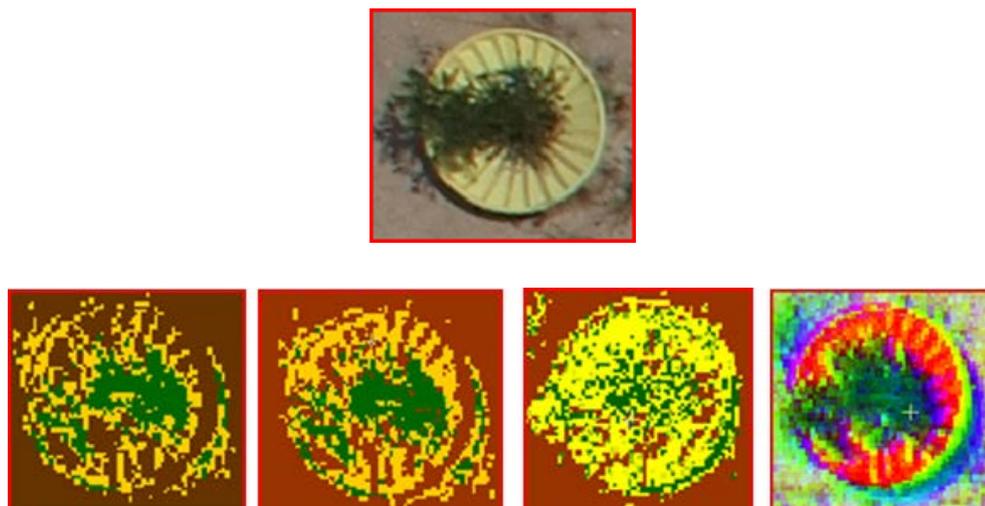


Ilustración 6.15. Detalle de un Waterboxx con *Robinia pseudoacacia* a 15 m de altura, con los cuatro tratamientos digitales De izquierda a derecha: NDVI, SAVI, Green NDVI y ACP

6.1.2.2. Identificación de marras en *Robinia pseudoacacia*

Como en el caso anterior, cuando el Waterboxx contiene una marra, se puede apreciar fácilmente la marra en cualquiera de los índices empleados al no existir tonos verdes. Destacamos las ventajas del ACP donde se minimizan las posibilidades de confusión porque los colores de los orificios centrales, como se puede ver en la Ilustración 6.16 son cercanos al azul pálido.

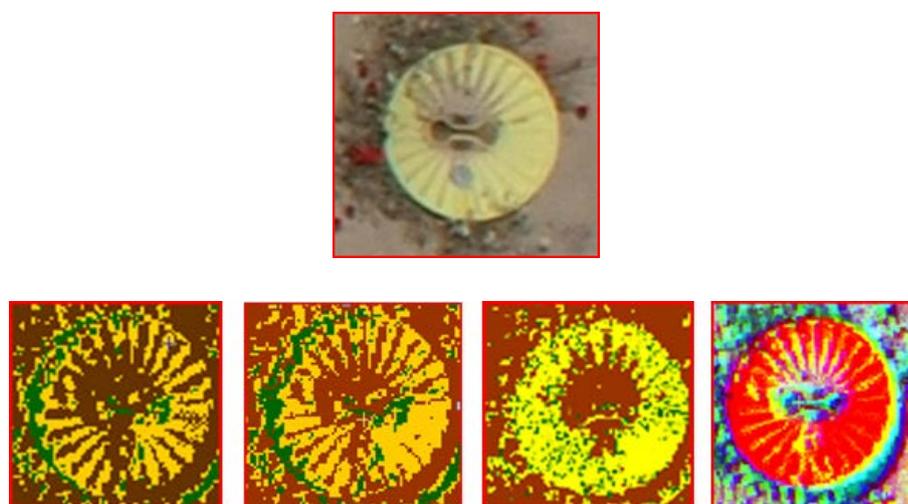


Ilustración 6.16. Detalle de una marra de *Robinia pseudoacacia* en un Waterboxx. De izquierda a derecha: NDVI, SAVI, Green NDVI y ACP

Pero como éstos pueden inducir a errores al realizar la fotointerpretación de la imagen, procedemos a aplicar el filtro de paso alto para mejorar la detección de bordes. El filtro que aplicamos es el filtro Sobel, que también se aplicó en el ensayo de Villarramiel. Este filtro

refuerza el contraste y muestra los bordes realzados en verde y la vegetación en rojo. En la Ilustración 6.17, en el caso de Waterboxx que contiene planta viva, se observa perfectamente una zona oscura y unas líneas rojas que delimitan los bordes de la vegetación. En los Waterboxx que no contienen plantas se puede apreciar el borde de los orificios centrales y las acanaladuras.

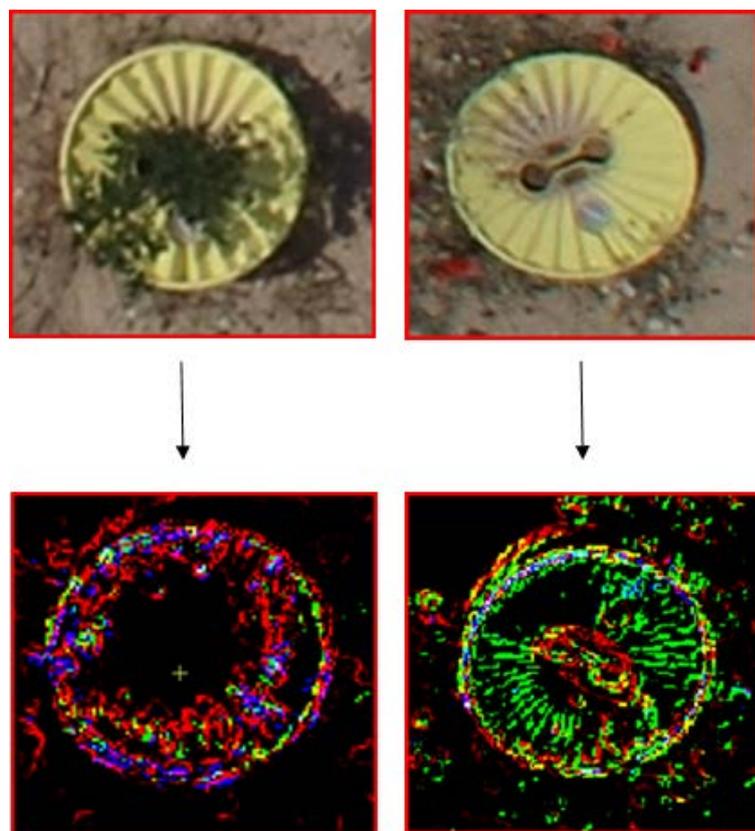


Ilustración 6.17. Detalle de dos Waterboxx con el filtro Sobel aplicado a la imagen ACP. A la izquierda planta viva de *Robinia pseudoacacia* y a derecha marra

6.1.2.3. Cálculo de la exactitud en la detección de marras mediante teledetección

Una vez aplicados los cuatro tratamientos digitales, realizamos la identificación de las plantas vivas y de las marras en los Waterboxx dentro del área determinada por los jalones (aproximadamente 40 x 25 metros, 54 plantones).

Para determinar la exactitud del procedimiento propuesto se adopta como criterio de análisis la identificación del plantón vivo dando por supuesto que aquello que no es identificable es una marra.

Para realizar este proceso analizamos el mosaico del vuelo a 15 metros, en base a la imagen resultante del ACP para la detección de los plantones vivos. Para la detección de

marras, nos centramos en la aplicación del filtro de paso alto Sobel sobre la misma imagen. Se confirma que el ACP es el tratamiento con el que hemos obtenido resultados más exitosos tanto para la identificación de plantas vivas como para las marras.

Para determinar la exactitud de los datos obtenidos mediante tratamiento digital se procede a calcular la matriz de confusión correspondiente (tabla 6.11) y a partir de la misma, determinar la Exactitud Global de la clasificación calculada como el número total de aciertos con respecto al total de plantones analizados. De esta forma se contrastan los datos determinados por teledetección con la verdad terreno.

Con este método y, aplicando dicho criterio, se alcanza una Exactitud Global (número total de aciertos / total) del 98.1% (53/54).

Tabla 6.11. Tabla de confusión aplicada a la *Robinia pseudoacacia*

		VERDAD TERRENO				
		Plantón vivo	Marra	Total	Error usuario (%)	Error comisión (%)
IMAGEN	Plantón vivo	43	1	44	97.73	2.27
	Marra	0	10	10	100	0
	Total	43	11	54		
	Error productor (%)	100	90.91			
	Error omisión (%)	0	9.09			

La Exactitud Global obtenida en la matriz de confusión es muy elevada y sólo existe un caso de confusión debido a una errónea interpretación de la respuesta espectral de los orificios del Waterboxx donde existía una planta de pequeño tamaño.

El mayor problema es que el proceso de obtención del mosaico y la aplicación de los tratamientos digitales es tedioso y complicado, difícil de automatizar y probado únicamente en parcelas pequeñas y, dentro de ellas, en sectores muy reducidos. La cámara multiespectral conlleva una serie de problemas que hacen que este método sea muy complicado de utilizar en zonas más extensas.

6.1.3. Resultados del tercer vuelo en Soto de Cerrato (Palencia). Año 2013

La calidad del trabajo de campo entregado por la empresa Geobit Consulting no nos ha permitido continuar con el método definido en este trabajo para este tipo de cámaras multispectrales por los siguientes motivos:

- Las imágenes no tienen integrada la posición GPS. Existe un log de vuelo que cruza los datos de posición del Microdrone con cada imagen para determinar su posición, pero la estimación ofrece unos resultados enormemente imprecisos.
- Las posiciones de fotografiado no se han fijado de forma previa a la ejecución del vuelo. En su lugar, se ha establecido un intervalo de captura de 5 segundos (independientemente de la altura y de la velocidad de vuelo).
- No se han preseleccionado las imágenes y muchas de las que se han cargado en la aplicación Web corresponden a posicionamientos del Microdrone, originadas por esa programación de 5 segundos.
- La altura de vuelo no se corresponde con la fijada. Hay puntos en los que el vuelo es muy alto y en otros, demasiado bajo.
- El solape es excesivo en algunos casos (cerca del 90%) y nulo en otros. La falta de estabilidad en el valor de la altura afecta enormemente a este parámetro.
- En algunas parcelas, la acción del viento ha provocado que las imágenes no se tomen perpendiculares al suelo, sino inclinadas. Esto también afecta enormemente al solape.
- No se ha fotografiado la totalidad de la parcela.
- En torno al 10% de las imágenes tiene alguno (o varios) de los sensores sobreexpuestos (quemados) y la fotografía se ve totalmente blanca. Esto impide que se pueda extraer información alguna.
- Las fotografías presentan fuertes diferencias radiométricas.
- El 100% de las imágenes están ligeramente desenfocadas.
- Más del 50% de las imágenes se ven borrosas.
- Más del 10% de las imágenes sufren del efecto "*Rolling-Shutter*" que provoca que la imagen aparezca deformada. Este efecto se observa claramente en los Waterboxx, ya que, en lugar de presentar una forma circular, presentan una forma similar a un riñón.

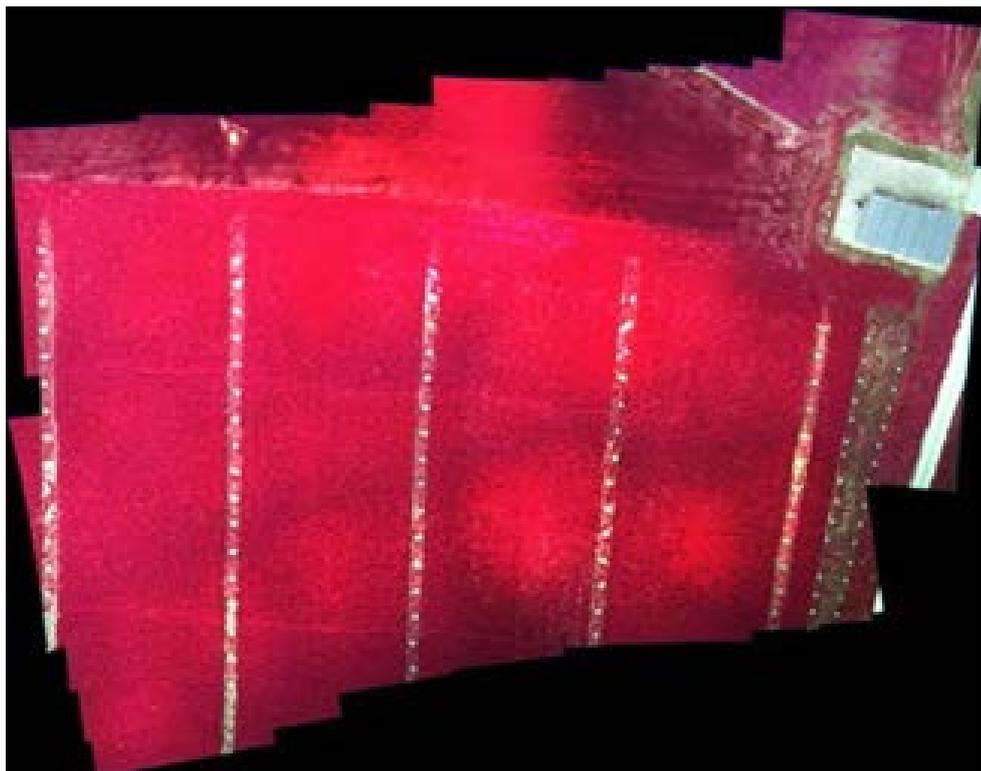


Ilustración 6.18. Mosaico de media parcela generado con las imágenes tomadas por la cámara multispectral en Soto de Cerrato

A pesar de la escasa calidad de las imágenes, al analizarlas de forma independiente, intentamos generar el mosaico con ayuda del Kolor Autopano PRO, pero únicamente conseguimos crear el mosaico de una parte de la parcela (Ilustración 6.18). La imposibilidad de alcanzar resultados objetivos en los tratamientos digitales por los motivos expresados, la insuficiencia de datos (el mosaico es parcial) y la dificultad de automatizar este método, es lo que nos ha hecho inclinarnos por abandonarla y cambiar a la utilización de doble cámara (convencional y modificada), cuyos resultados se describen a continuación.

6.2. RESULTADOS CON CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA (OLYMPUS PEN E-P1) + MULTIRROTOR

6.2.1. Resultados del cuarto vuelo en Soto de Cerrato (Palencia). Año 2013

El resultado del primer trabajo de campo que realizamos con las dos cámaras convencionales en dos vuelos diferentes nos ofrece unos resultados esperables aunque en ambos vuelos (visible e IR) hemos detectado los siguientes problemas:

- En el primero de ellos que realizamos con la cámara Olympus Pen EP-1 (visible/RGB), pudimos obtener fotografías de gran calidad gracias a las características de su sensor. Todas se obtuvieron con buenas condiciones de luminosidad y perfectamente enfocadas. El efecto del viento afectó a la inclinación de un porcentaje elevado de imágenes, lo que puso en peligro el solape y, por tanto, la generación del modelo 3D.
- En el segundo vuelo (IRc) además de sufrir los mismos problemas de inclinación que en el anterior, todas las imágenes salieron desenfocadas. La modificación realizada en la Olympus EP1 para poder captar el IR afectó al enfoque de la cámara. Este tipo de modificaciones siempre generan este defecto y la cámara debe de reajustarse con un paso previo al vuelo por los operarios de campo (la empresa Geobit no ejecutó este paso).

Tras la realización de los vuelos se obtienen 56 imágenes en visible/RGB y 55 con la IRc (Ilustración 6.19). Con la altura media de 66 m obtenemos sobre el terreno una huella de pixel de 0.02 metros/píxel. A pesar de los problemas de las imágenes, podemos generar y texturizar correctamente los modelos 3D de ambas parcelas (ilustración 6.20).



Ilustración 6.19. Ejemplo de fotografía capturada en visible (izquierda). Ejemplo en IR (derecha)

Tras la creación, con el *software* PCI Geomática, de las ortofotos en IRc y RGB (GeoTIFF) se comprueba que el solape entre ambas es correcto y que la desviación no supera el píxel (2 cm), lo que nos va a proporcionar resultados de gran calidad (ilustración 6.21).

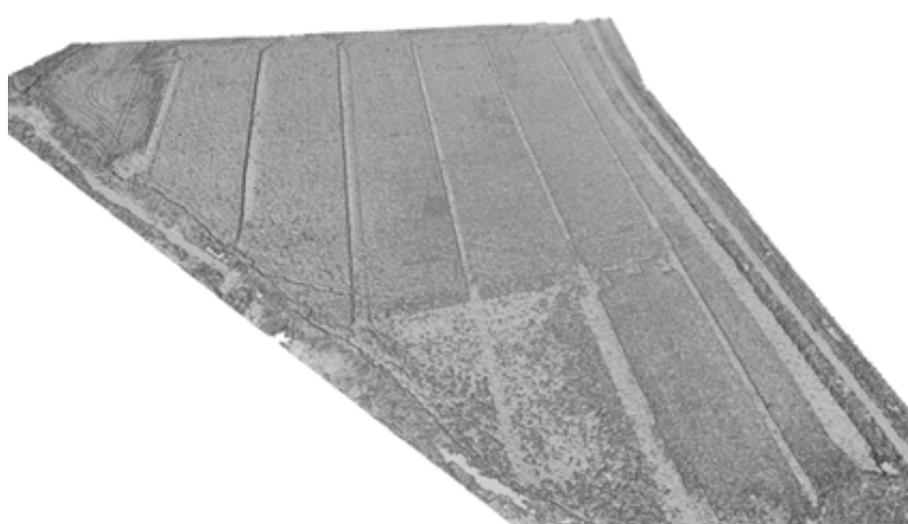


Ilustración 6.20. Captura en perspectiva del modelo 3D con las fotografías en IRc

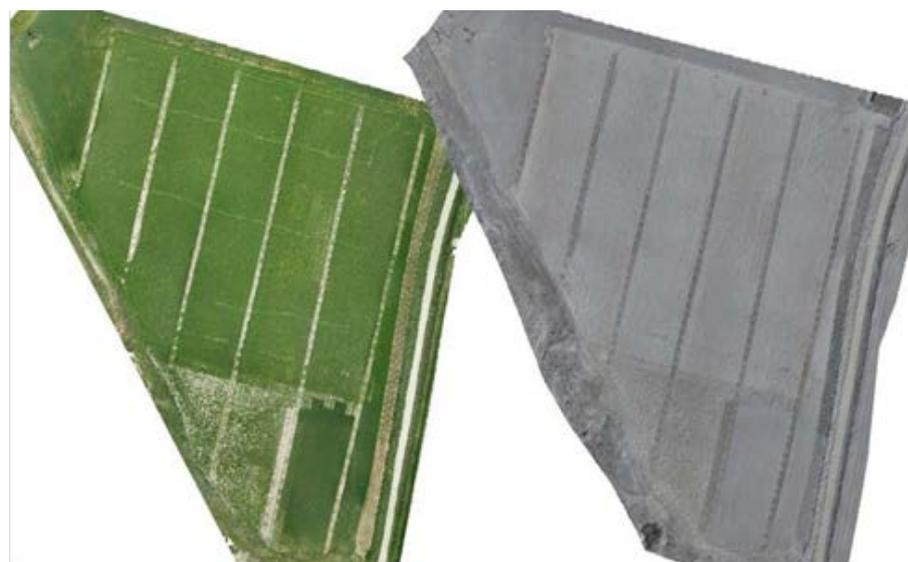


Ilustración 6.21. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

Posteriormente, mediante el mismo programa, se transforman al formato PIX y se integran los 4 canales (IRc/R/G/B) para poder realizar los tratamientos digitales adecuados para la detección de marras.

Tal y como hemos definido anteriormente, se realizan las diferentes transformaciones, pero tras comprobar las distintas posibilidades nos centramos en el índice Green NDVI ya que este índice es mucho más sensible a la concentración de clorofila que el índice NDVI y

comprobamos que es el que mejores resultados obtiene. A continuación, en las ilustraciones 6.22 y 6.23, se muestran capturas del índice generado con PCI Geomática.

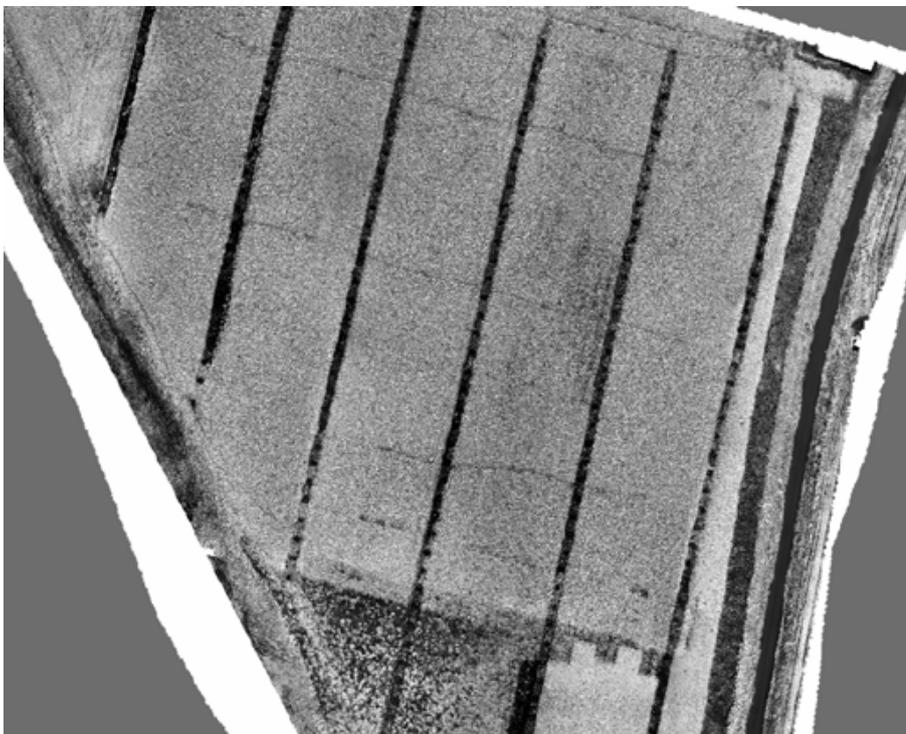


Ilustración 6.22. Imagen del índice Green NDVI en escala de grises de la parcela de Soto de Cerrato

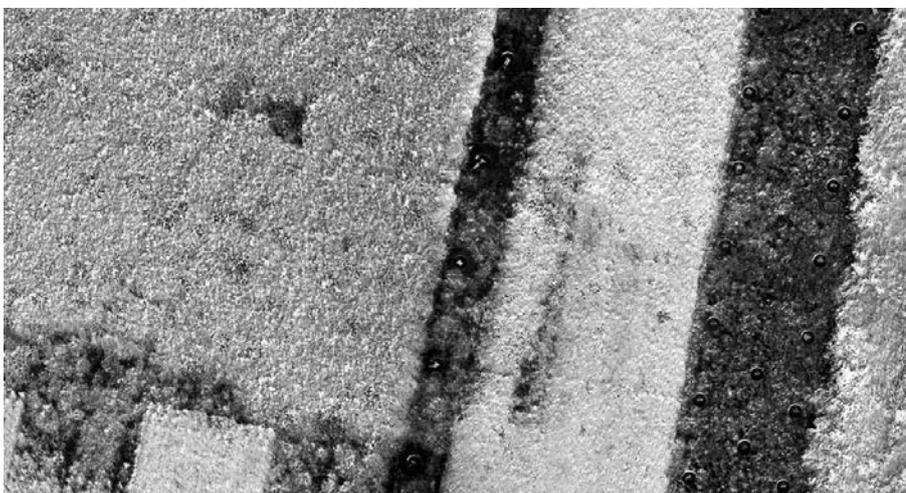


Ilustración 6.23. Detalle del índice Green NDVI en escala de grises

Seguidamente creamos una imagen en pseudocolor Green NDVI para mejorar la visualización y conseguir que las características sean más evidentes para el análisis. Esta imagen aparece en la Ilustración 6.24.

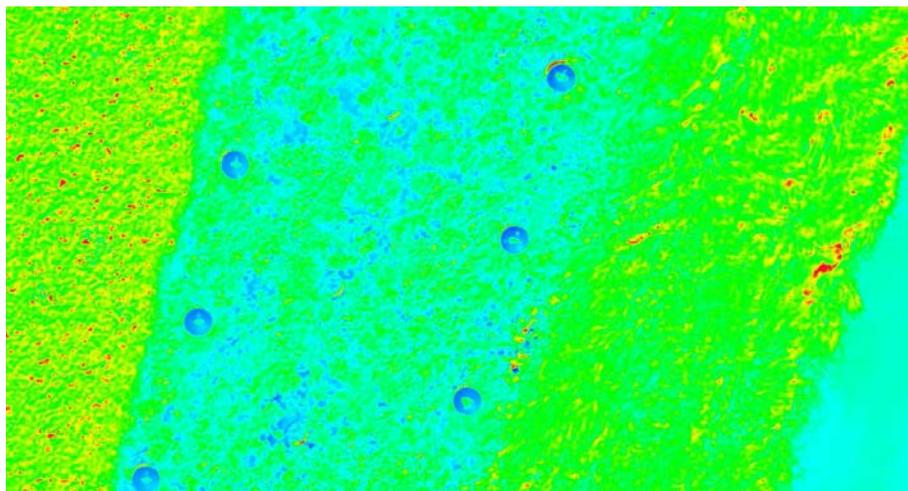


Ilustración 6.24. Imagen Green NDVI pseudocolor de una parte de la ortofoto

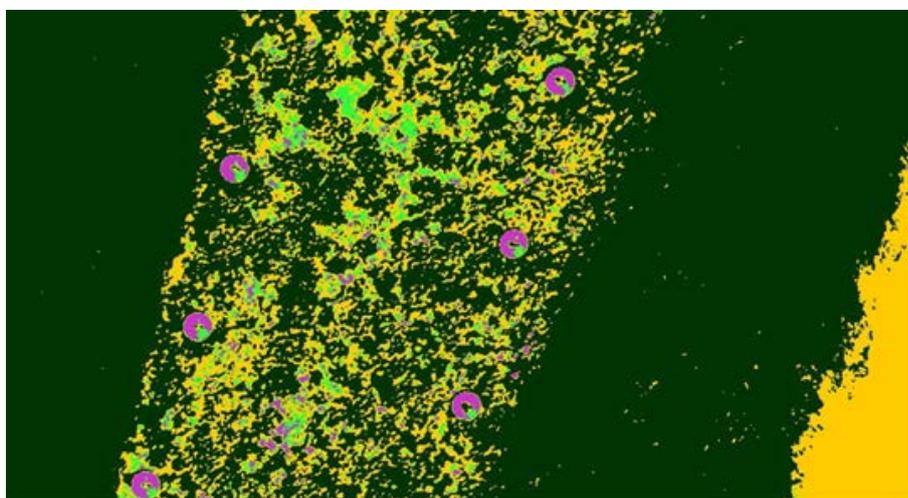


Ilustración 6.25. Imagen Green NDVI con la paleta de colores modificada para mejorar la identificación de marras

En la Ilustración 6.25, modificamos la paleta de colores para mejorar la identificación de las marras. Así podemos discernir claramente los Waterboxx, que aparecen en color violeta. El color verde oscuro se corresponde con la vegetación vigorosa siendo más claro cuanto menos vegetación existe. Por otro lado, el suelo desnudo se corresponde con el color amarillo. En base a esta composición es posible identificar de forma objetiva la existencia de marras.

Observamos que los dos orificios que aparecen en la Ilustración 6.26 en color verde representan el vigor de una planta (en verde), si bien sólo es importante que nos fijemos en que en sólo uno de ellos (el izquierdo), es el que presenta la planta viva a su alrededor.

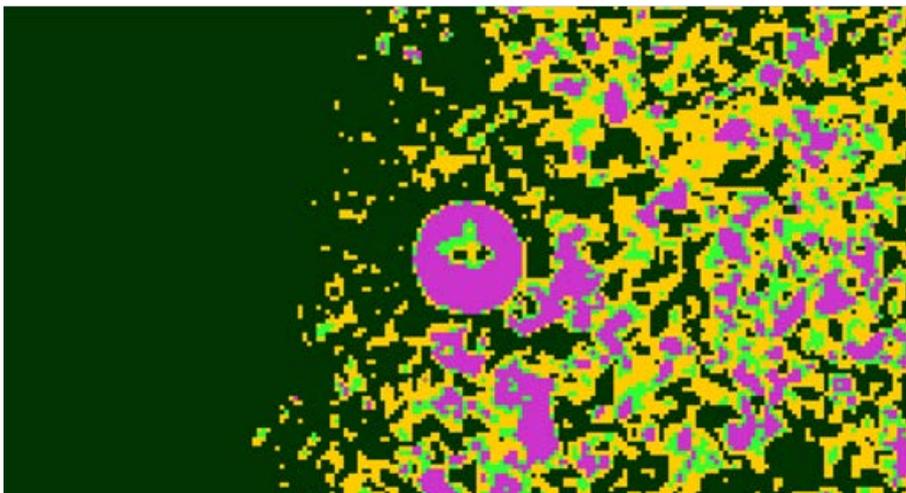


Ilustración 6.26. Imagen Green NDVI con la paleta de colores modificada. Detalle de un Waterboxx

El ACP crea bandas artificiales a partir de las originales con la máxima cantidad de información (Ilustración 6.27). Al analizar la primera imagen resultante, se observa que, a diferencia del estudio previo, ésta no aporta información útil al trabajo, seguramente debido a que el IRc está desenfocado. Los buenos resultados obtenidos con el índice Green NDVI permiten prescindir de este análisis, por lo que se excluye del presente trabajo pero es importante que lo comprobemos en posteriores vuelos.

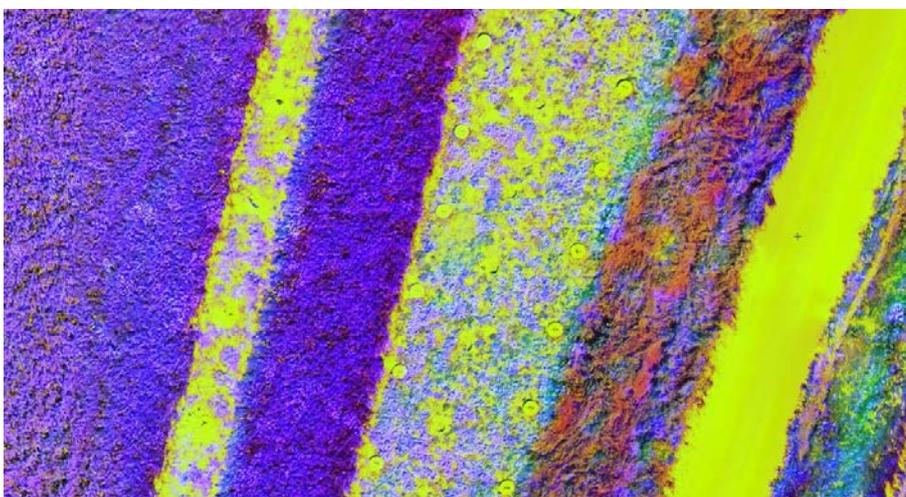


Ilustración 6.27. Detalle del Análisis de Componentes Principales

El análisis visual de toda la composición coloreada del índice Green NDVI, indica que todos los Waterboxx presentan en su interior vegetación sana, y que por lo tanto, la supervivencia en esta parcela es del 100%, lo cual coincide con los datos de campo facilitados.

6.2.2. Resultados del quinto vuelo en Soto de Cerrato (Palencia). Año 2014

El vuelo ya se realiza con las dos cámaras (IRc y RGB) montadas en un soporte especial y su disparo se tiene que sincronizar para que las capturas de las imágenes se realicen en el mismo instante. Esto nos va a permitir que la textura del modelo 3D se extraiga de fotografías obtenidas prácticamente desde los mismos puntos de vista. Este esquema, diseñado a finales de la campaña de vuelos del año 2013, permite que la textura de las ortofotos coincida, algo fundamental para identificar marras en plantas de cierto porte (superiores a 1 metro de altura). Todas las fotos salen perfectamente enfocadas.

Durante el vuelo se realizan 173 fotografías tanto en visible/RGB como en IRc. Con la altura de vuelo media de 63 metros se obtiene sobre el terreno una huella de píxel de 0.02 metros/píxel (Ilustración 6.28).



Ilustración 6.28. Ejemplo de fotografía capturada en visible/RGB (izquierda) e IRc (derecha)

Tras la creación, a partir de los modelos 3D, de las ortofotos en IRc y RGB se comprueba que el solape es correcto y que la desviación no supera el píxel (2 cm), lo cual implica que vamos a obtener resultados de gran calidad (Ilustración 6.29).



Ilustración 6.29. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

Posteriormente se generan los archivos PIX de ambas ortofotos con el *software* PCI-Geomática y se integran ambas en un único archivo con la siguiente configuración de canales B/G/R/IRc. A continuación, se determinan los índices Green NDVI (no lo obtenemos con la paleta de colores modificada), se realiza el tratamiento ACP y también se crea la composición coloreada 4/3/2 (IRc/R/G), para comprobar sus resultados.

En la Ilustración 6.30, se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes para comprobar cómo se comportan los índices en cada caso. En cada fila de arriba abajo: visible/RGB, composición 4/3/2, Green NDVI, ACP y en cada columna, de izquierda a derecha: muy vigorosa (columna izquierda), vigorosa (columna central) y poco vigorosa (columna derecha).

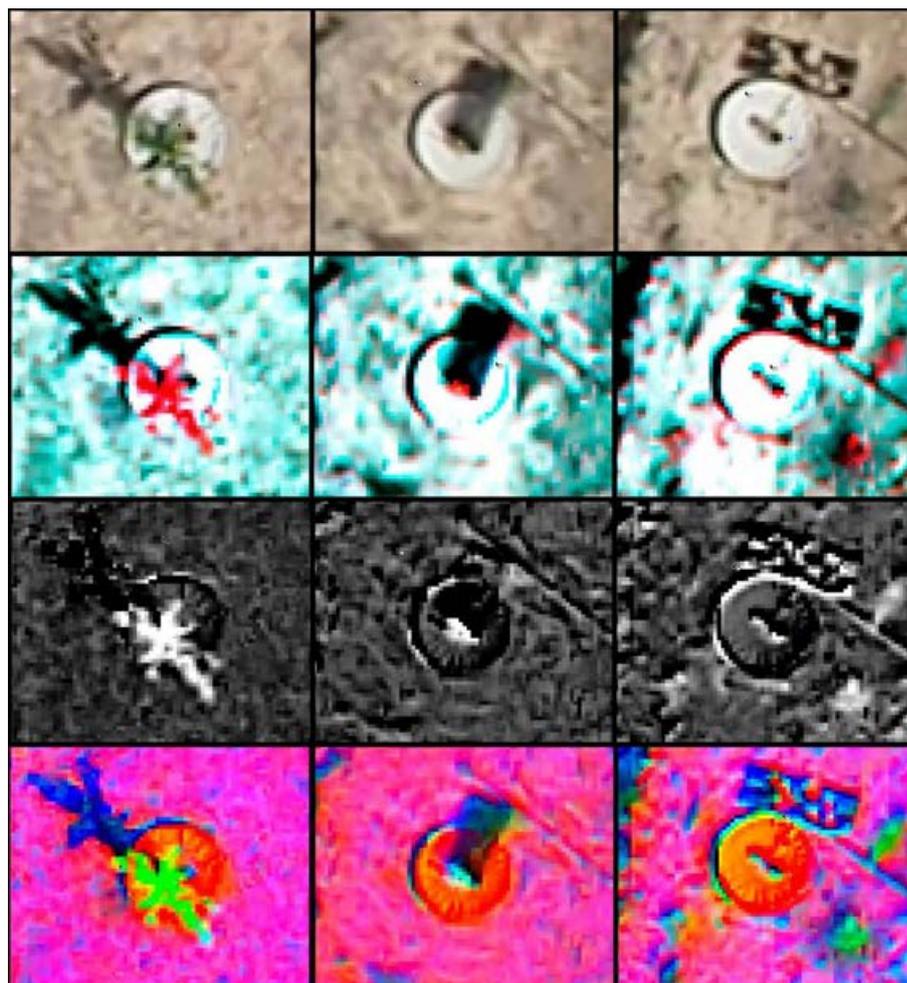


Ilustración 6.30. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes. Cada columna representa una planta: muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). Y cada fila de arriba abajo: visible/RGB, composición 4/3/2, Green NDVI, ACP

A partir del índice Green NDVI y de los tratamientos ACP y composición coloreada podemos distinguir sin problemas las plantas que están vivas y las que están muertas (figuras 6.31, 6.32 y 6.33).

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo se han obteniendo los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 175 en Waterboxx.
 - Plantas vivas: 173.
 - Waterboxx dudosos: 2.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 0.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 2.
 - Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados remitimos a la tabla 17, anejo 5.3.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que los 2 plantones dudosos están muertos, mientras que el resto están todos vivos (acierto).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 1.1% (2/175) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 100% (175/175).

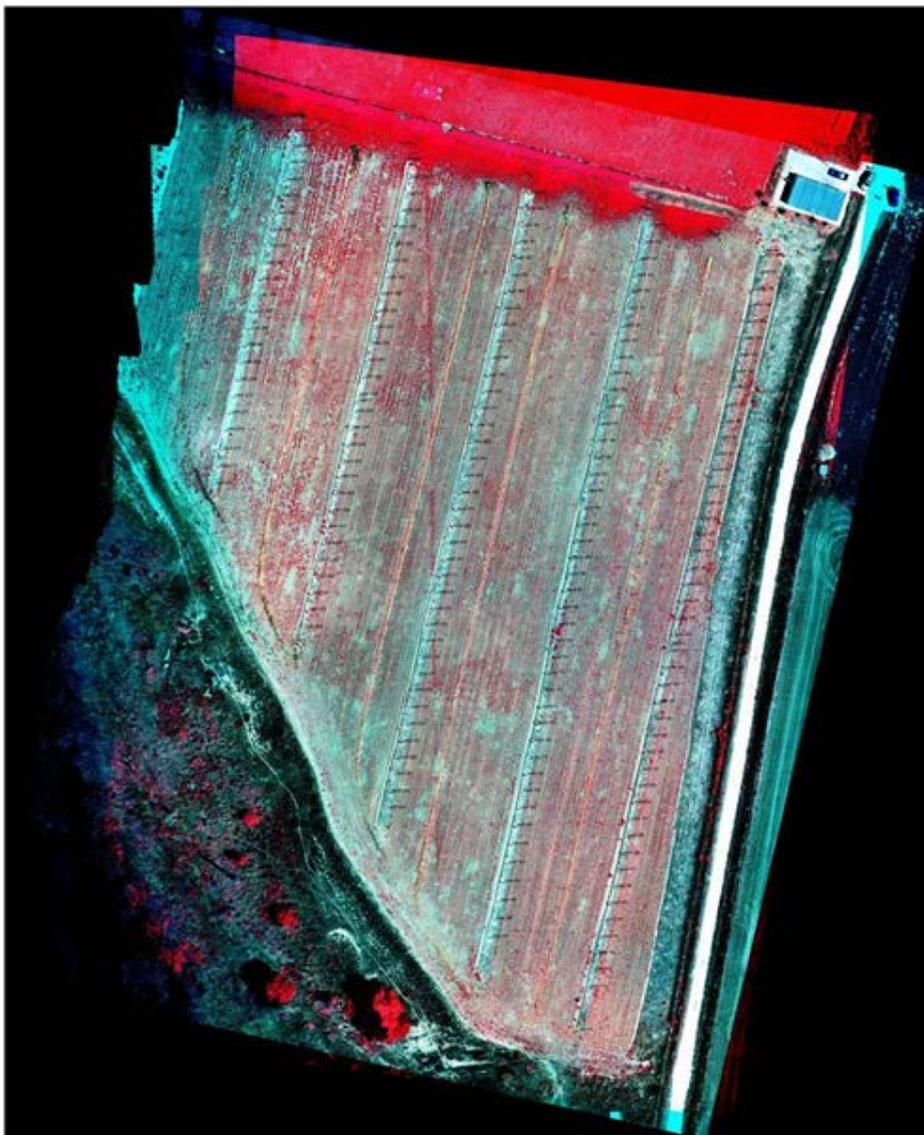


Ilustración 6.31. Composición 4/3/2

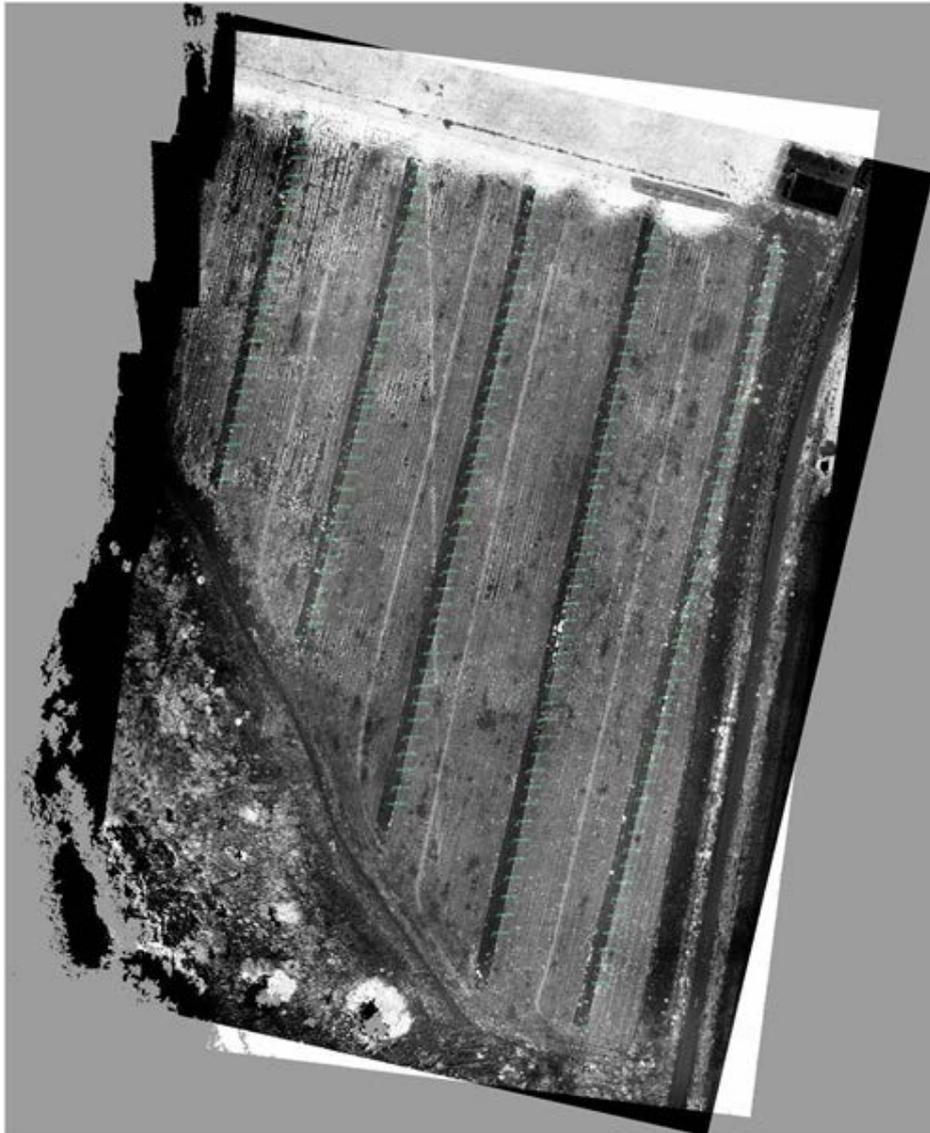


Ilustración 6.32. Índice GreenNDVI

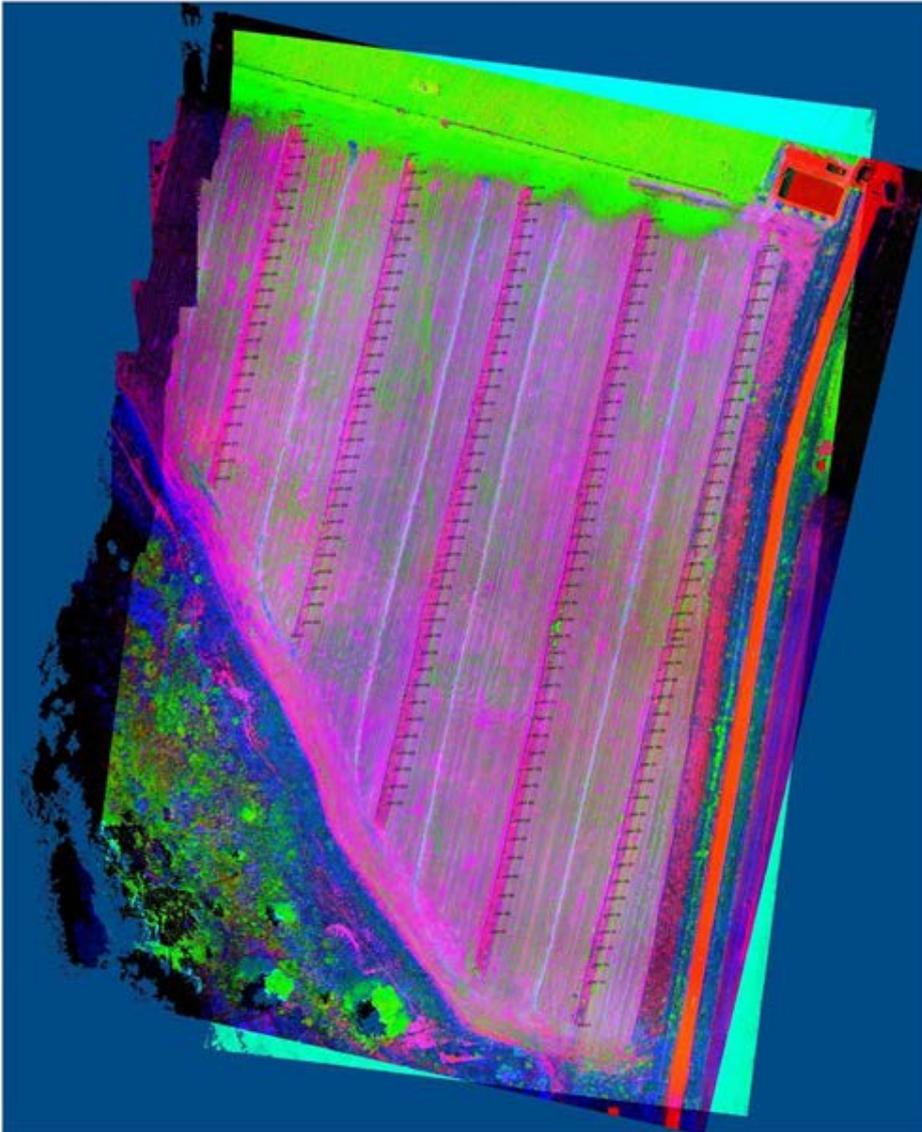


Ilustración 6.33. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.2.3. Resultados del sexto vuelo en Sarracín de Aliste (Zamora). Año 2013

El trabajo de campo en Sarracín se va a desarrollar siguiendo todas las recomendaciones marcadas, excepto en lo referente al número de puntos de control. El aspecto discordante con el método original afecta a la calidad en la georreferenciación de los modelos. Aunque se definió un número entre 5 y 10 puntos de control, en esta parcela de grandes dimensiones, se deberían haber empleado 10 o más (se emplearon únicamente 9), lo que nos va a resultar insuficiente para llegar a un resultado óptimo.

Todas las imágenes de ambos vuelos (IR y visible/RGB) se obtienen en buenas condiciones de luminosidad y perfectamente enfocadas. Además, la escasa presencia e intensidad del viento permite que las imágenes presenten una inclinación mínima, lo que repercute en un solape adecuado.

Tras realizar los vuelos se obtienen 60 imágenes en visible/RGB y 62 en IRc. Con la altura media de 62 metros conseguimos una huella de pixel de 0.02 metros/pixel sobre el terreno (Ilustración 6.34).



Ilustración 6.34. Ejemplo de fotografía capturada en IR (izquierda) y visible/RGB (derecha)

La calidad de los dos vuelos nos permite generar y texturizar sin problemas los modelos 3D de la parcela. Los 9 puntos de control tomados con GPS en campo se aplican a cada modelo de forma independientemente para generar las dos ortofotos: visible/RGB e IR (GeoTIFF).

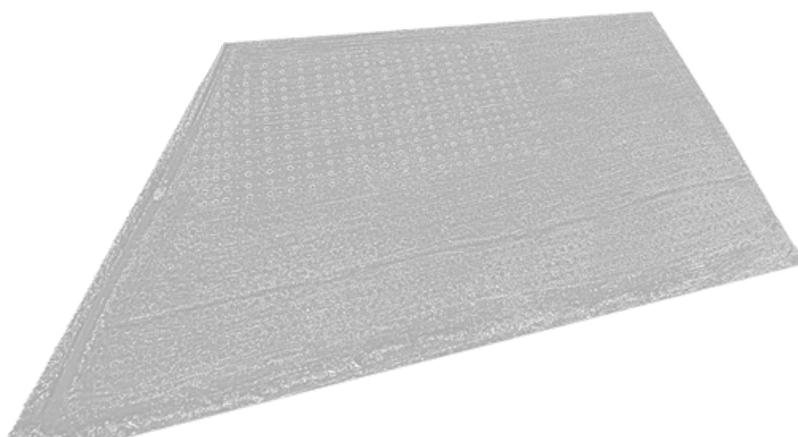


Ilustración 6.35. Captura en perspectiva del modelo 3D realizado con las fotografías en visible



Ilustración 6.36. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

Al cargar las dos ortofotos se comprueba que el solape es aceptable, ya que las desviaciones entre ambas se sitúan en torno al píxel (2 cm sobre el terreno) lo que resulta consecuente con la precisión de los puntos utilizados para la georreferenciación medidos con GPS (Ilustración 6.36).

Sin embargo, también se descubre que, a pesar de que todos los Waterboxx de la ortofoto generada con el visible coinciden con los Waterboxx de la ortofoto generada con el IRc, no ocurre lo mismo con las plantas de mayor porte (clones de cerezo en la zona NE con alturas comprendidas entre 180 y 225 cm). Estas plantas no han sido modeladas, principalmente por lo contraproducente que sería realizar el fotografiado a la altura necesaria para ese objetivo.

Dado que el *software* de restitución fotogramétrica PhotoScan no tiene constancia de estos elementos salientes, proyecta su información pictográfica sobre el modelo 3D del terreno. Es decir, pega la textura de cada planta sobre el terreno a partir de la porción de la imagen más adecuada para cada zona.

Si los puntos de vista desde donde se toman las fotografías no son los mismos entre las usadas para generar el modelo digital en IR y visible, como es el caso, esta proyección es diferente para cada ortofoto, por lo que, al superponerlas, estas proyecciones no coincidirán (aunque podrían hacerlo por azar).

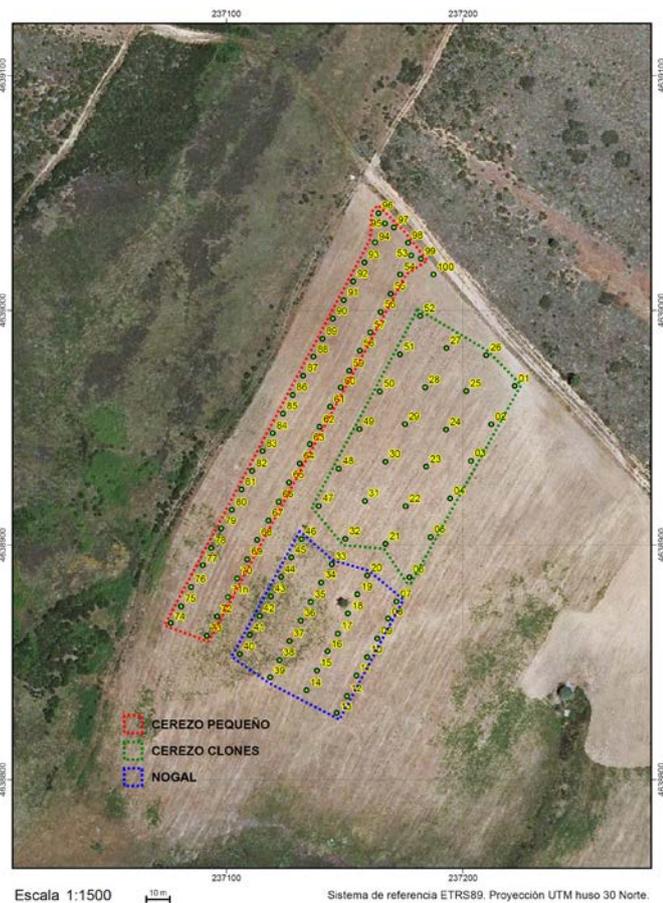


Ilustración 6.37. Zonificación de los tipos de plantas y puntos de muestreo de marra realizado en campo dentro del Proyecto LIFE+: “Los Desiertos Verdes”. (ETRS89, proyección UTM huso 30N)

Además, muchas de las plantas de la zona NO, O y S (cerezos y nogales), tienen un porte muy reducido y en muchos casos, la escasez o incluso ausencia de hojas, impide que se refleje información gráfica de las mismas en las fotografías (ver Ilustración 6.37). En estos casos, generalmente sucede que un único píxel es mayor que la propia planta lo que imposibilita el reconocimiento visual. Es por ello que, uno de los aspectos más problemáticos del vuelo, fue la altura de las pasadas, demasiado elevada en relación al porte de las plantas de menor tamaño de esta parcela.

Posteriormente, se transforman al formato PIX mediante el *software* PCI-Geomática para poder realizar los tratamientos digitales ya definidos.

Tras importar las ortofotos en PCI-Geomática e integrar los 4 canales (IRc/R/G/B) se está en disposición de realizar los tratamientos digitales adecuados para la detección de marras. Los canales de este nuevo archivo PIX se reordenan de la siguiente manera: B/G/R/IRc.

En la ilustración 6.38 se muestra una transición de los tratamientos digitales realizados con el objetivo de determinar marras en *Prunus avium* (cerezo) y *Junglans regia* (nogal), que son plantas de escaso porte situadas al N, NO y S de la parcela.

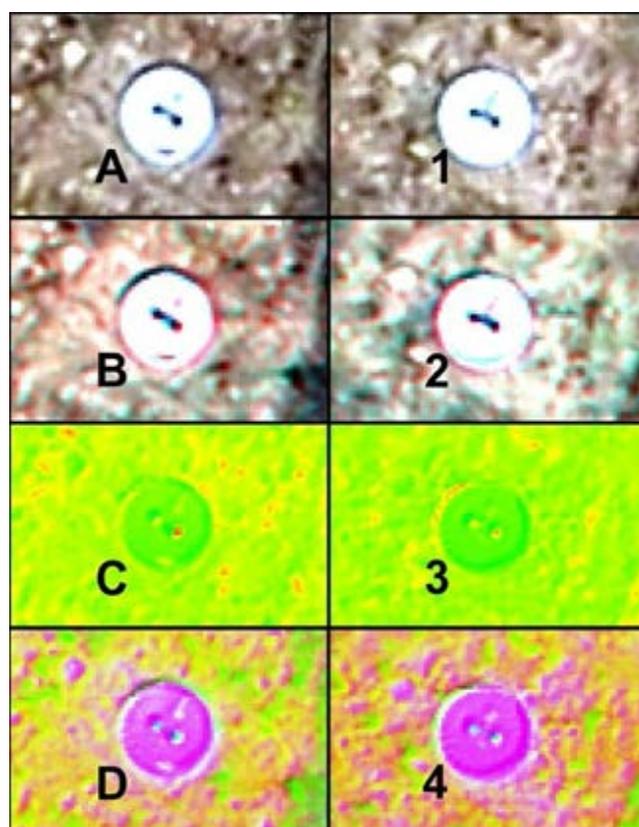


Ilustración 6.38. Marra de *Prunus avium* (cerezo), columna izquierda (A-D). Planta viva de *Prunus avium* (cerezo), columna derecha (1-4)

La imagen presenta dos secuencias de capturas con varios tratamientos digitales: A-1, porción de orto Visible; B-2, composición IRc/R/G (4/3/2); C-3, índice Green NDVI y D-4, ACP. Como se aprecia a simple vista, la secuencia de la izquierda (A-D), la cual representa una marra, no difiere en absoluto de la secuencia de la derecha (1-4), que se trata de una planta viva. Esto es extensible a todas los cerezos (excepto los cerezos clonados) y nogales de la parcela, por lo que resulta imposible determinar marras en estas plantas.

A continuación, en la Ilustración 6.39, se muestra una transición de los tratamientos digitales realizados con el objetivo de determinar marras en los clones de cerezo (plantas altas de porte superior a 2 m al NE de la parcela).

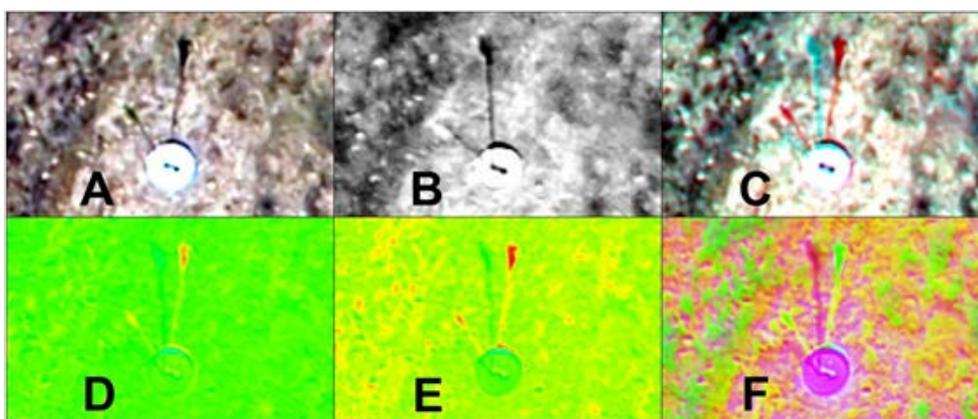


Ilustración 6.39. Transición de tratamientos digitales en un Waterboxx con proyecciones no coincidentes en clones de *Prunus avium* (cerezo). Visible/RGB, A; IRc, B; composición IRc/Rojo/Verde (4/3/2), C; NDVI, D; Green NDVI, E; ACP, F

Las capturas A y B de la imagen forman parte de las ortofotos en visible e IRc, respectivamente. A simple vista comprobamos cómo la proyección de la planta y de su sombra es diferente en cada ortofoto. Esto queda más patente en la captura C (composición 4/3/2), donde se observan 4 perfiles de la planta. Con un color azul aparecen las proyecciones procedentes del IRc de la planta y su sombra, y en un color rojizo, las derivadas del visible.

A continuación, la imagen D se corresponde con el NDVI y la E con el Green NDVI. Ambos índices nos muestran claramente información referente a las dos proyecciones (planta/sombra) extraídas del visible (color rojizo con bordes amarillos), siendo más patentes en el Green NDVI. Las proyecciones del IRc son casi inapreciables con estos dos índices o se confunden con la información del suelo.

Por último, la captura F muestra el resultado del ACP. En este caso, al igual que en el Green NDVI, obtenemos la respuesta de la planta/sombra derivada del visible, quedando las del

IRc relegadas a segundo plano. Este tipo de composiciones favorece la discriminación de los Waterboxx y de las plantas por lo que resulta muy interesante.

Para finalizar, en la Ilustración 6.40, se muestra una transición de tratamientos digitales similar a la realizada anteriormente, pero en un Waterboxx en el que, por azar, han coincidido las proyecciones de la planta.

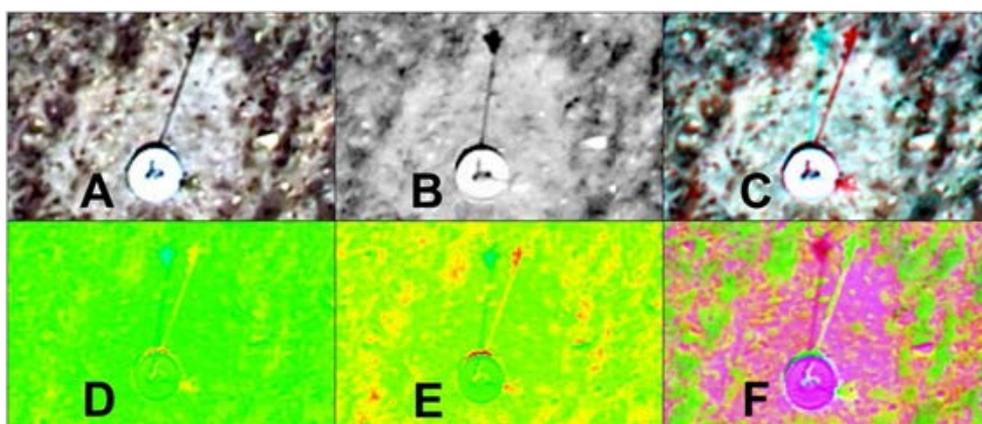


Ilustración 6.40. Transición de tratamientos digitales en un Waterboxx con proyecciones coincidentes en *Prunus avium* (cerezo). Visible/RGB, A; IRc, B; composición IRc/Rojo/Verde (4/3/2), C; NDVI, D; Green NDVI, E; ACP, F

En este caso observamos que las proyecciones de las plantas son coincidentes (en torno al 90%), aunque no ocurre lo mismo con sus sombras (la posición de los puntos de vista desde donde se tomaron las fotografías es muy similar, pero se trata de dos vuelos diferentes, por lo que hay un desfase temporal). Si nos ceñimos a la proyección de la planta (cerezo) observamos que el rojo de la composición 4/3/2 (C) es más intenso. Sería posible afirmar que la planta está viva tanto en el NDVI como en el Green NDVI, mostrando como respuesta un amarillo y un amarillo rojizo, respectivamente. El ACP por su parte nos muestra la planta viva con un tono verdoso amarillento, tal y como se ve en la captura F.

A través de la fotointerpretación de las diferentes composiciones propuestas es posible decidir de forma objetiva si los clones de cerezo son marras o no.

El análisis visual de las composiciones de la zona NE de la parcela (clones de cerezo) indica que los Waterboxx analizados presentan en su interior vegetación sana, y que por lo tanto, la supervivencia es del 100% lo cual coincide con los datos de campo facilitados.

En el caso de los nogales y cerezos de bajo porte, como hemos explicado, es imposible predecir marras.

6.2.4. Resultados del séptimo vuelo en Fuensaldaña (Valladolid). Año 2013

El trabajo de campo se va a realizar siguiendo los criterios fijados, salvo que en este caso, por primera vez, ambas cámaras se van a juntar en el mismo soporte (Visible/RGB e IRc) en el Microdrone, con lo que se va a conseguir reducir el número de vuelos a uno.

El disparo de ambas se sincroniza para que las capturas se realicen en el mismo instante, con el fin de que la textura del modelo 3D se obtenga de fotografías tomadas desde el mismo punto de vista. Con ello conseguimos que las proyecciones de las plantas sean coincidentes y se puedan realizar los análisis.

Esta integración permite obtener una idéntica altura de vuelo en las fotografías, por lo que la resolución de las ortofotos también será igual. Tras realizar el vuelo obtenemos 90 imágenes en visible/RGB y en IRc. Para una altura media de 56 metros conseguimos una huella de pixel en el terreno de 0.015 metros/pixel (Ilustración 6.41).



Ilustración 6.41. Ejemplo de fotografía capturada en IRc (izquierda) y visible/RGB (derecha)

La calidad de los dos vuelos nos permite generar y texturizar sin problemas los modelos 3D de la parcela. Los 9 puntos de control tomados con GPS en campo se aplican a cada modelo de forma independientemente, lo que nos va a permitir generar las dos ortofotos: visible e IR (GeoTIFF) que posteriormente se transforman al formato PIX mediante el *software* PCI-Geomática para poder realizar los tratamientos digitales.

Al cargar las dos ortofotos se comprueba que el solape es correcto, ya que las desviaciones entre ambas se sitúan en torno al píxel (1,5 cm) (Ilustración 6.42).



Ilustración 6.42. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

A igual que en las otras parcelas, se genera el archivo PIX con los canales B/G/R/IRc mediante la integración de las dos ortofotos. Del mismo modo, se determinan los índices Green NDVI y ACP. En la Ilustración 6.43, se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes para comprobar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (1, columna izquierda), vigorosa (2, columna central) y poco vigorosa (3, columna derecha).

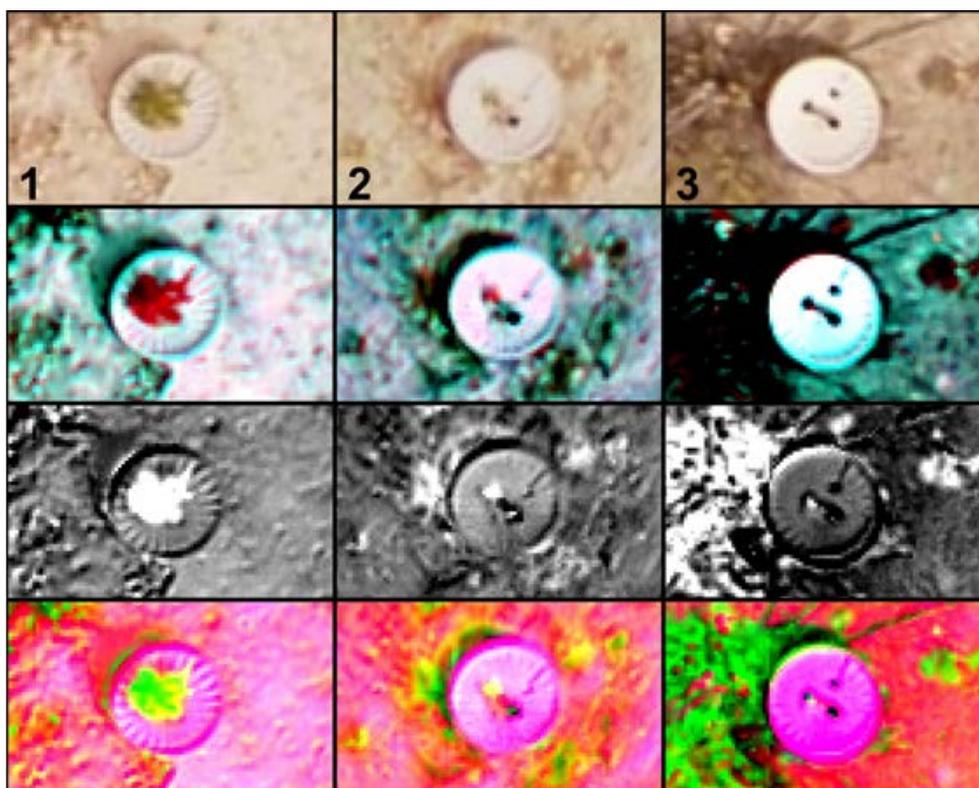


Ilustración 6.43. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes. Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: visible, composición 4/3/2, Green NDVI, ACP

En esta ilustración 6.43 se puede observar que a partir de los índices Green NDVI y ACP podemos evaluar si las plantas están vivas o muertas sin problemas. Esta parcela es la más interesante de cara a analizar la potencialidad del método propuesto, ya que no presenta ninguno de los problemas concurrentes encontrados en otros vuelos anteriores (IRc desenfocado, falta de solapamiento de las proyecciones de las plantas en las ortofotos, altura de vuelo excesiva, etc.) que afectaron a los resultados obtenidos.

Los datos de campo tomados que contienen la información del estado de las plantas con Waterboxx sólo incluyen 13 registros de pino, encina y rosál. Las coordenadas de los registros no se solapan correctamente con la ortofoto, por lo que es necesario asociarlos al Waterboxx más cercano. La supervivencia del 100% en las 13 plantas con Waterboxx muestreadas se corrobora con los tratamientos digitales. Además, se analizan el resto de plantas obteniendo los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 175 plantas en Waterboxx.
 - Plantas vivas: 163.
 - Waterboxx dudosos: 12.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 3.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 9.
 - Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 15, Anejo 5.1.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que de los 12 plantones dudosos 6 están vivos con invasión de otras especies y 3 tienen respuesta débil debido a su pequeño porte. Los otros 3 plantones están muertos (acierto) y que 1 planta dada como viva es un falso positivo (error).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 6.9% (12/175). También calculamos el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 99.4% (174/175).

6.2.5. Resultados del octavo vuelo en Fuensaldaña (Valladolid). Año 2014

Tras la realización del vuelo se obtienen 89 imágenes en visible/RGB y otras 89 en IRc. Con la altura de vuelo media de 51 m se obtiene sobre el terreno una huella de píxel de 0.013 metros/píxel (Ilustración 6.44). Tras la creación de las ortofotos en IRc y visible/RGB se comprueba que el solape es correcto y que la desviación no supera el píxel (1.3 cm), suficiente para obtener resultados de gran calidad (Ilustración 6.45).



Ilustración 6.44. Ejemplo de fotografía capturada en visible/RGB (izquierda) e IRc (derecha)

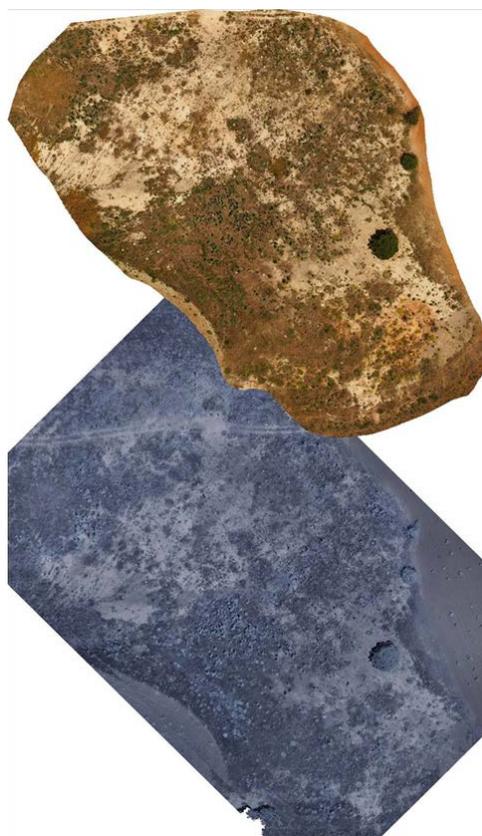


Ilustración 6.45. Conjunto de imágenes en visible/RGB (arriba) y en IRc (abajo)

Al igual que en las otras parcelas, se genera el archivo PIX con los canales B/G/R/IRc mediante la integración de las dos ortofotos y se integran ambos en un único archivo con la siguiente configuración de canales: B/G/R/IRc. Posteriormente se realizan los tratamientos digitales, creándose la composición 4/3/2 (IRc/R/G) y se determinan los índices Green NDVI y ACP.

A continuación se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes para comprobar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (columna izquierda), vigorosa (columna central) y poco vigorosa (columna derecha) (Ilustración 6.46).

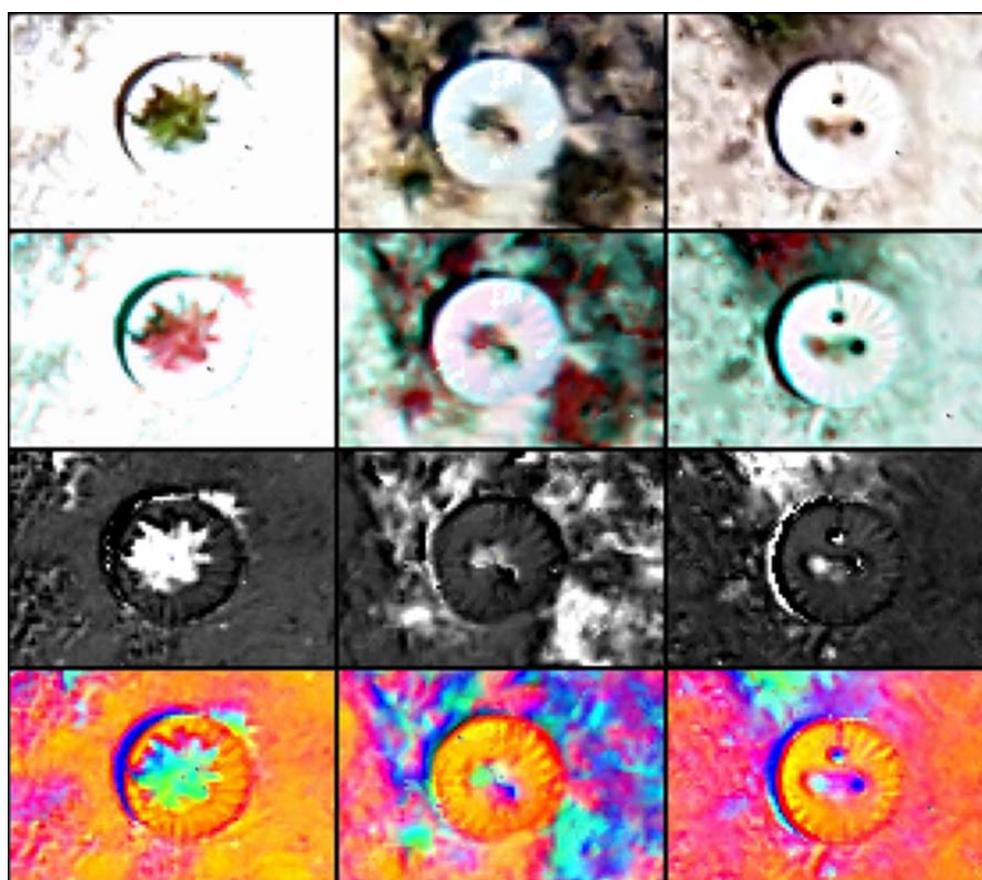


Ilustración 6.46. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes. Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: visible (RGB), Composición 4/3/2, Green NDVI, ACP

En la figura se puede apreciar cómo es posible distinguir fácilmente, a partir de estos índices, si las plantas están vivas o muertas e incluso el desarrollo fenológico que presentan.

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo (ilustraciones 6.47, 6.48 y 6.49) se han obtenido los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 291 plantas en Waterboxx.
 - Plantas vivas: 287.
 - Waterboxx dudosos: 4
 - Tapados parcialmente por vegetación: 1.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 3.
 - Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 16, Anejo 5.2.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que de los plantones dudosos, 4 están muertos (acierto), mientras que en las plantas dadas como vivas hay 3 que son falsos positivos (error).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 1.4% (4/291) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 99.0% (288/291).

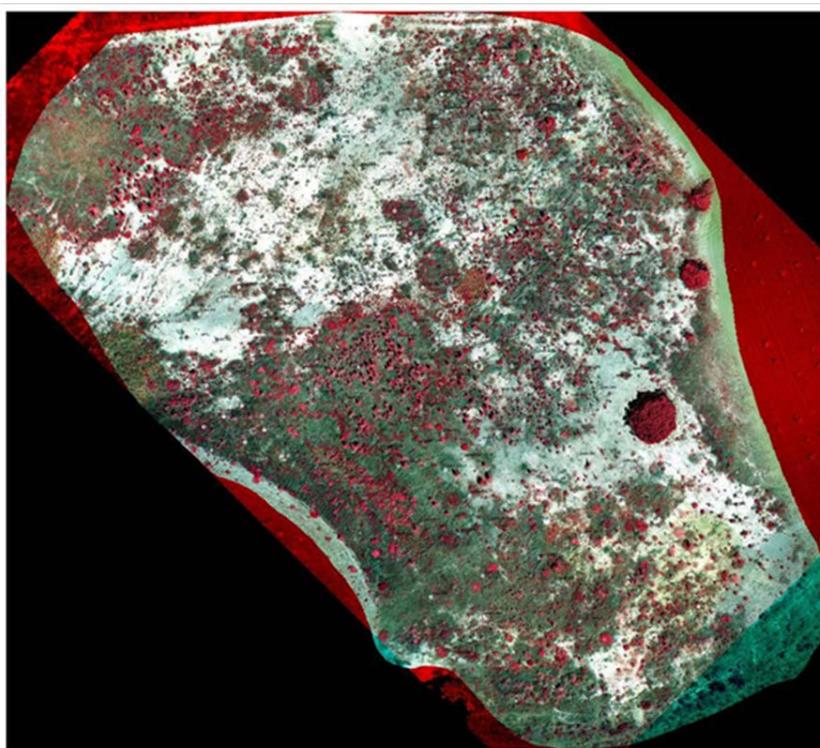


Ilustración 6.47. Composición 4/3/2

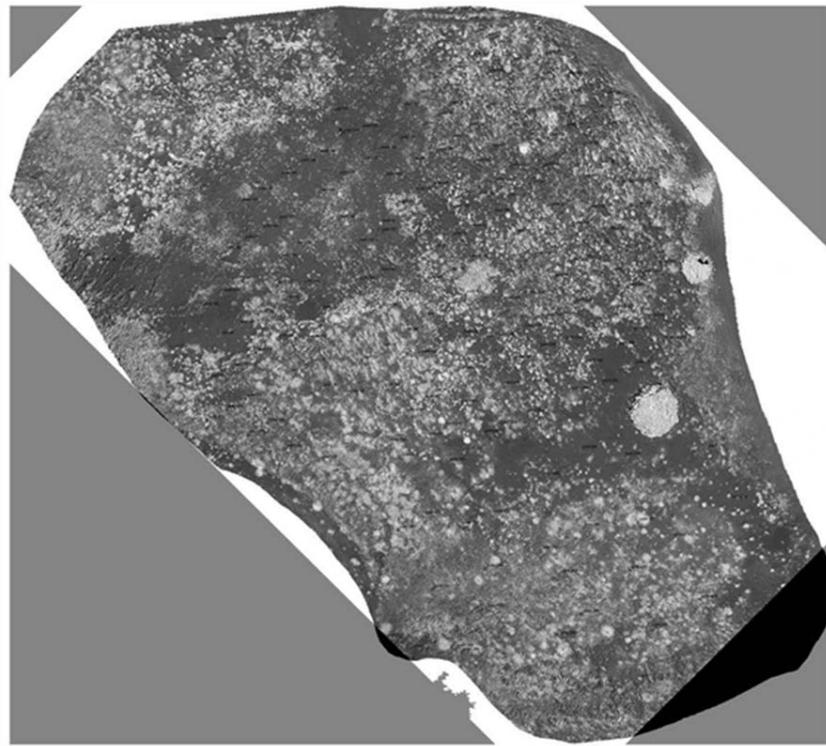


Ilustración 6.48. Índice Green NDVI

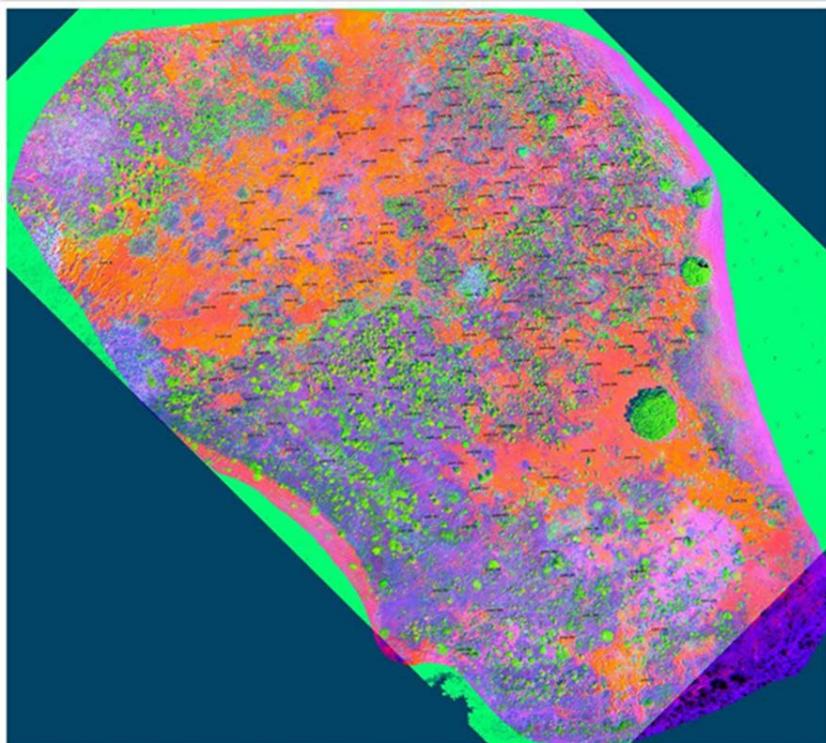


Ilustración 6.49. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.2.6. Resultados del noveno vuelo en la Finca de Matallana 1 (Valladolid). 2014

Tras realizar el vuelo se obtienen 221 fotografías tanto en visible/RGB como en IRc. Con la altura de vuelo media de 61 m se obtiene una huella de pixel sobre el terreno de 0.015 metros/píxel (Ilustración 6.50).

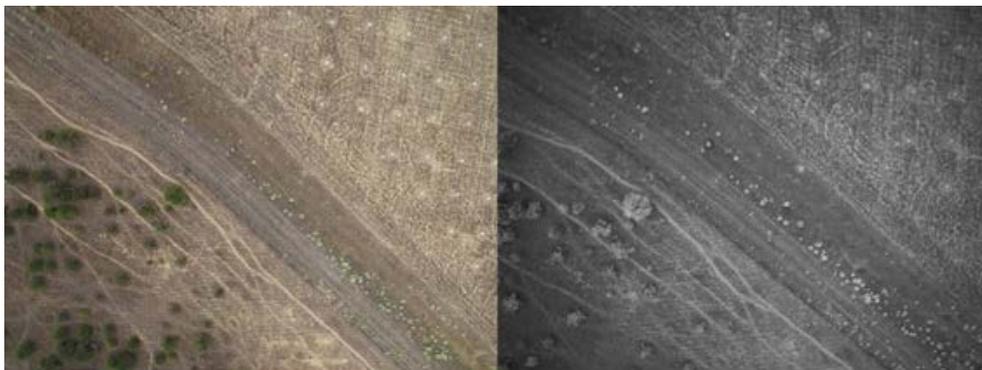


Ilustración 6.50. Ejemplo de fotografía capturada en visible/RGB (izquierda) e IRc (derecha)

Tras la creación de los modelos 3D se obtienen las ortofotos en IRc y RGB y se comprueba que el solape es correcto (aunque no tan fino como en la parcela de Soto de Cerrato). En este caso, la desviación se sitúa en torno a los dos píxeles (<4 cm), lo que supone obtener resultados de menor calidad (Ilustración 6.51).



Ilustración 6.51. Conjunto de imágenes en visible/RGB (arriba) y en IRc (abajo)

Tras generar los archivos PIX de ambas ortofotos con el *software* PCI-Geomática, se integran ambos en único archivo con la siguiente configuración de canales: B/G/R/IRc. Posteriormente se realizan los tratamientos digitales, creándose la composición 4/3/2 (IRc/R/G) y se determinan los índices Green NDVI y el ACP.

A continuación se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes de *Quercus ilex* (encina) para comprobar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (columna izquierda), vigorosa (columna central) y poco vigorosa (columna derecha) (Ilustración 6.52).

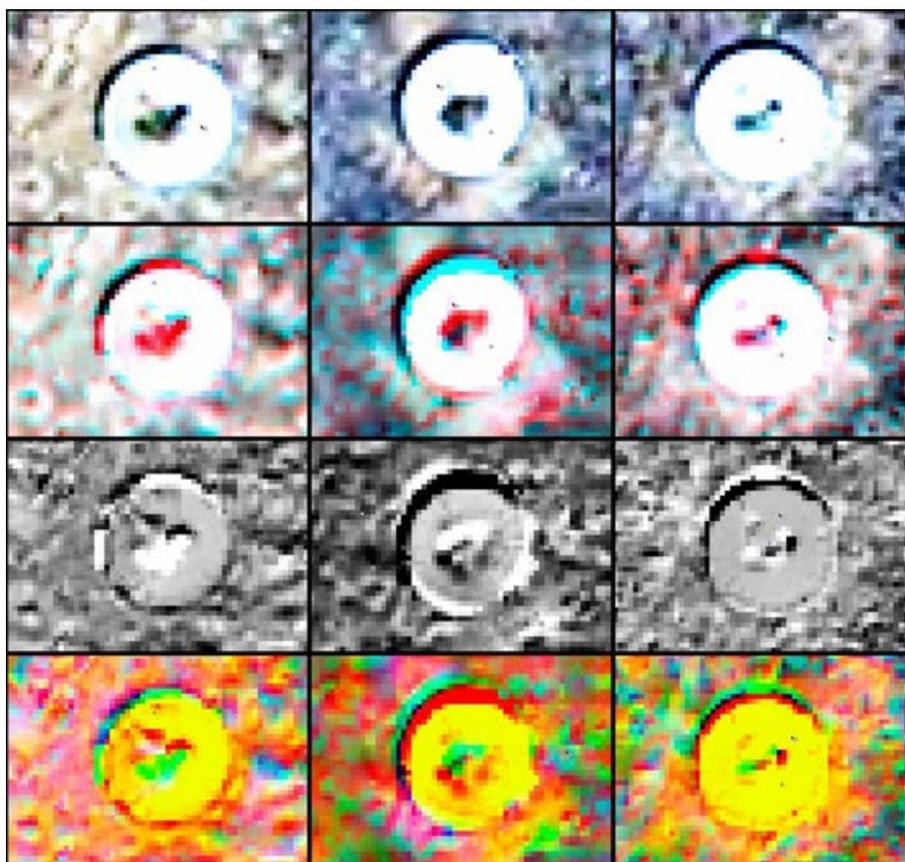


Ilustración 6.52. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes de *Quercus ilex* (encina). Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: visible, Composición 4/3/2, Green NDVI, ACP

Aunque es importante señalar que el deficiente solape puede generar dudas en algunos casos, en la ilustración podemos comprobar que, tanto el estado fenológico de las plantas como determinar si éstas están vivas o muertas, puede ser extraído correctamente a partir de los índices Green NDVI y ACP e incluso con la composición coloreada.

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo (ilustraciones 6.53, 6.54 y 6.55) se han obtenido los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 232 Waterboxx.
 - Plantas vivas: 225.
 - Waterboxx dudosos: 7.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 0.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 7.
 - Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 18, Anejo 5.4.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que hay 6 plantones dudosos que están vivos y que tienen respuesta débil debido a su pequeño porte y que 1 está muerto (acierto). También se comprueba que una planta dada como viva es un falso positivo (error).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 3.0% (7/232) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 99.6% (231/232).

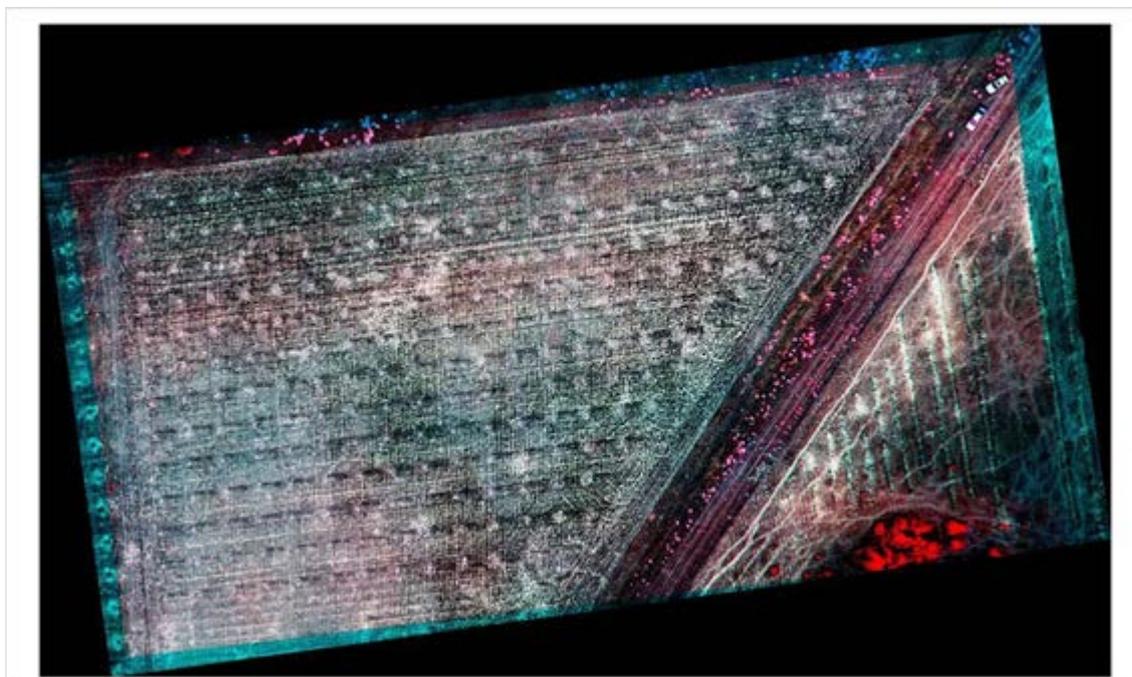


Ilustración 6.53. Composición 4/3/2

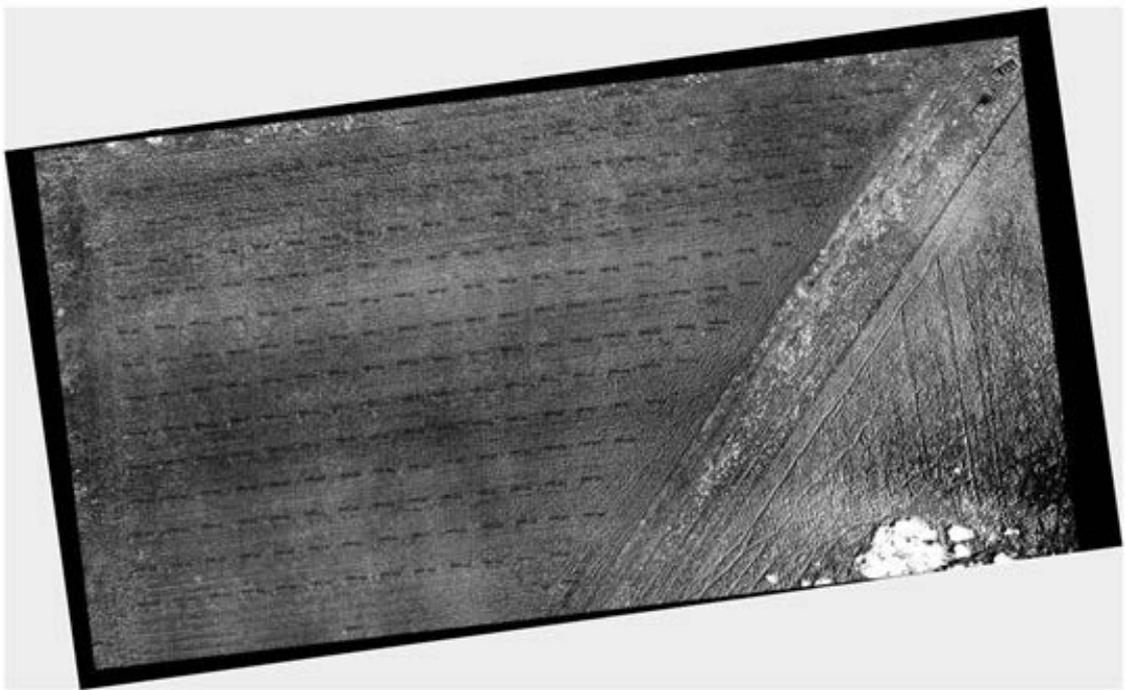


Ilustración 6.54. Índice Green NDVI

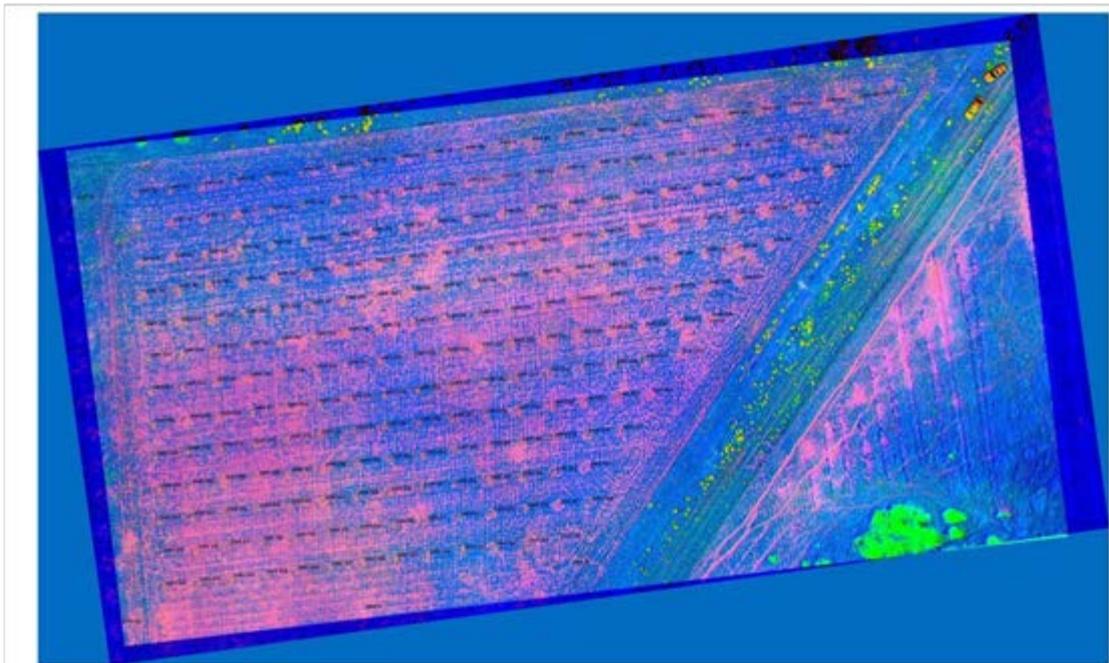


Ilustración 6.55. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.2.7. Resultados del décimo vuelo en San Isidro (León). Año 2015

Tras realizarse el vuelo se obtienen un total de 201 fotografías con la cámara RGB y 219 con la cámara IRc. Con la altura de vuelo media de 110 metros (respecto a la zona de despegue) se obtiene una huella de pixel sobre el terreno de 0.026 metros/píxel. Aunque se tomaron 11 puntos de control (PC) en la zona, se han utilizado únicamente 4 para georreferenciar la parcela (Ilustración 6.56).



Ilustración 6.56. Ejemplo de fotografía capturada en visible/RGB (izquierda) e IRc (derecha)

Tras la generación de los modelos 3D se obtienen las ortofotos en IRc y RGB y se comprueba que el solape es correcto, aunque no tan fino como en parcelas con un mayor número de puntos de control como Riofrío de Aliste. En este caso, la desviación se sitúa en torno a los dos píxeles (<4 cm), lo que supone obtener resultados de menor calidad (Ilustración 6.57).

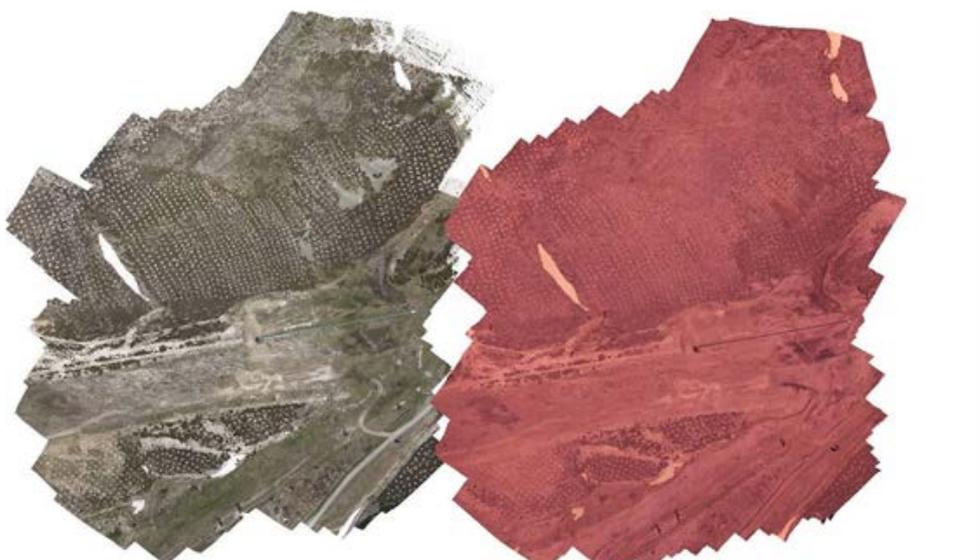


Ilustración 6.57. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

Tras generar los archivos PIX de ambas ortofotos con el *software* PCI-Geomática, se integran ambos en un único archivo con la siguiente configuración de canales: B/G/R/IRc. Posteriormente, se crea la composición 4/3/2 (IRc/R/G) y se determinan los índices Green NDVI y ACP.

A continuación se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes para demostrar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha).

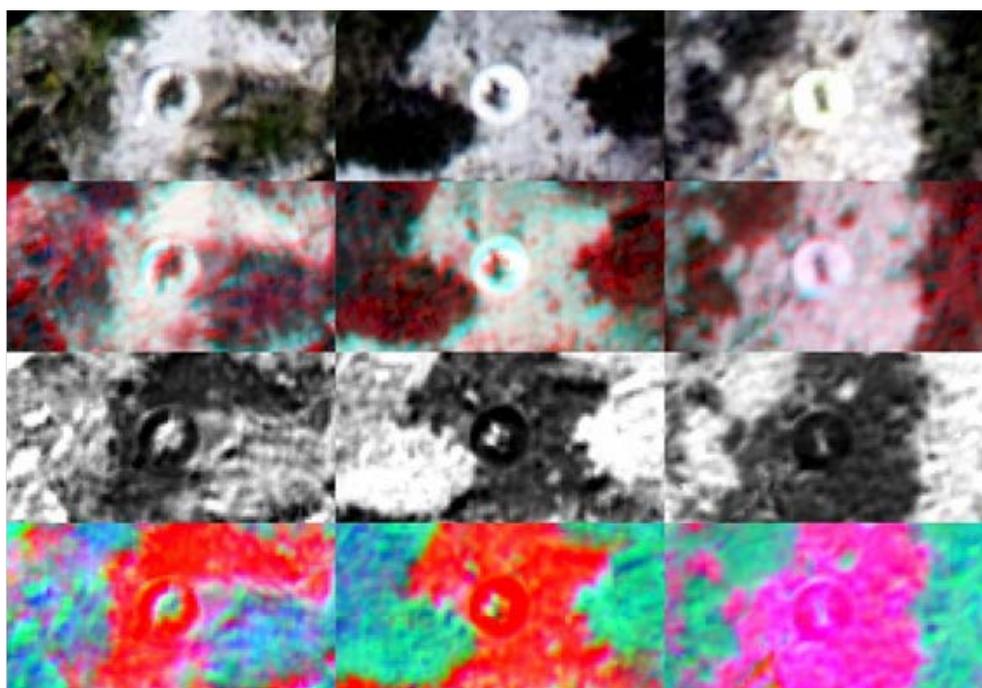


Ilustración 6.58. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes. Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: visible, composición 4/3/2, Green NDVI, ACP

En la Ilustración 6.58, podemos comprobar que el estado de las plantas más desarrolladas puede ser extraído, a partir de los índices Green NDVI y ACP sin problemas, pero en las menos desarrolladas es más problemático y puede ser motivo de confusión con marras. Afortunadamente la mayoría de las plantas están bien desarrolladas al estar ya la plantación en su cuarto año de vida (figuras 6.59, 6.60 y 6.61)

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo se han obtenido los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 132 Waterboxx.
 - Plantas vivas: 126.

- Waterboxx dudosos: 6.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 2.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 4.
- Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 19, Anejo 5.5.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que todos los plantones dudosos son marras (acierto) y que 3 plantas dadas como vivas eran falsos positivos (error).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 4.5% (6/132) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 97.7% (129/132).

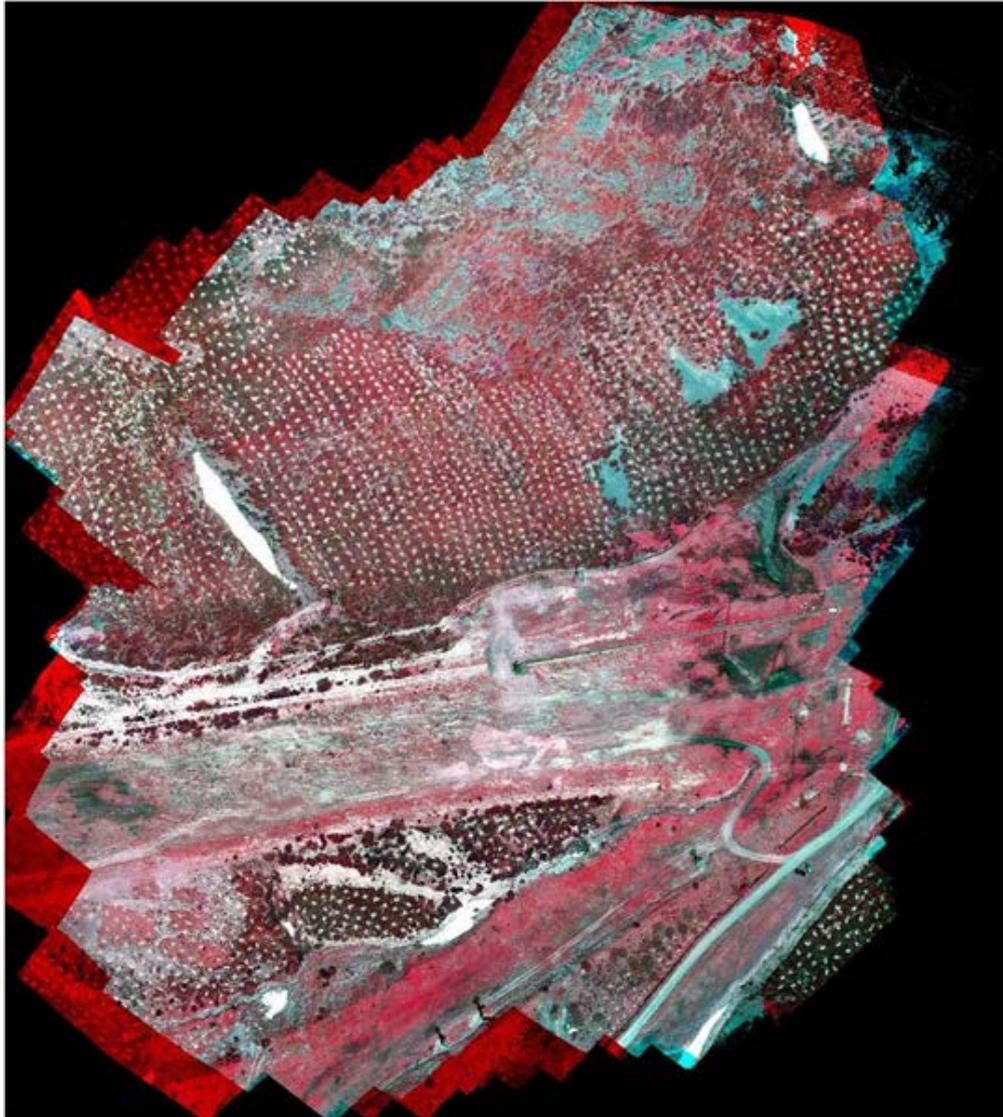


Ilustración 6.59. Composición 4/3/2

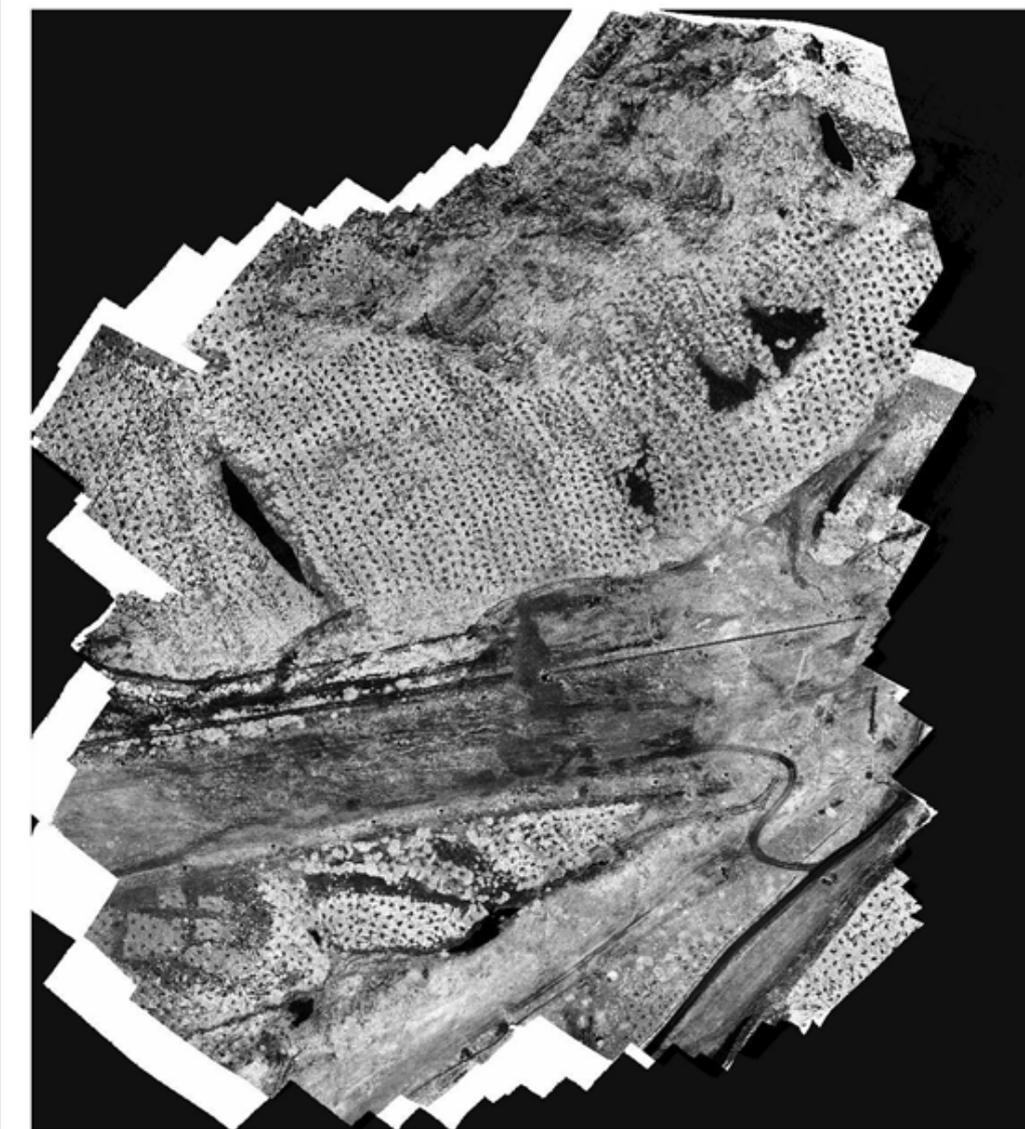


Ilustración 6.60. Índice Green NDVI

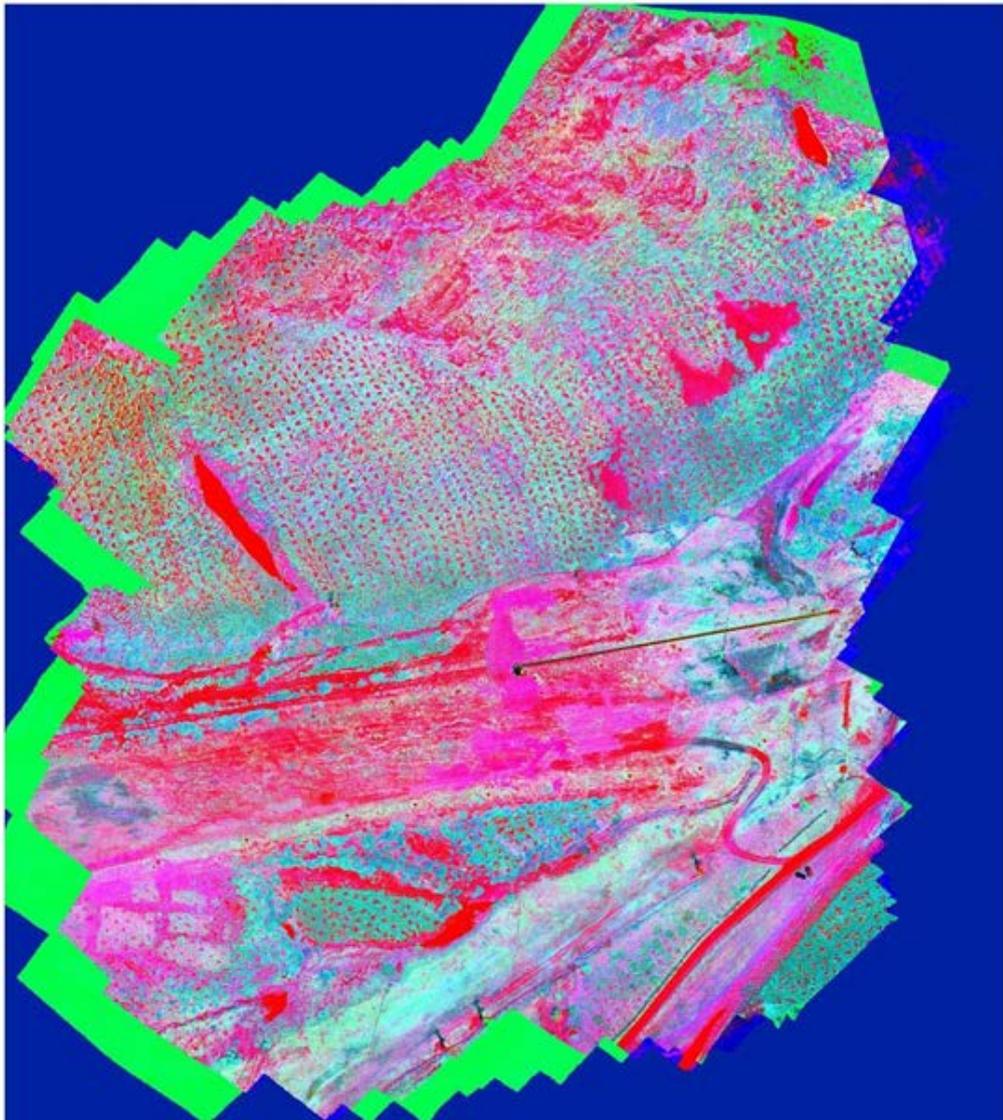


Ilustración 6.61. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.2.8. Resultados del undécimo vuelo en Riofrío de Aliste (Zamora). Año 2015

Se realizaron un total de 54 fotografías con ambas cámaras. La altura de vuelo media es de 78 m, con lo que se obtiene una resolución sobre el terreno de 0.019 metros/píxel. Se tomaron 12 PC para georreferenciar la parcela. La superficie total modelada representada en la ortofoto es de 2 Ha (Ilustración 6.62).



Ilustración 6.62. Ejemplo de fotografía capturada en Visible/RGB (izquierda). Ejemplo en IRc (derecha)

Tras la creación de las ortofotos en IRc y RGB se comprueba que el solape es correcto y que la desviación no supera el píxel (1.9 cm), suficiente para obtener resultados de gran calidad (Ilustración 6.63).

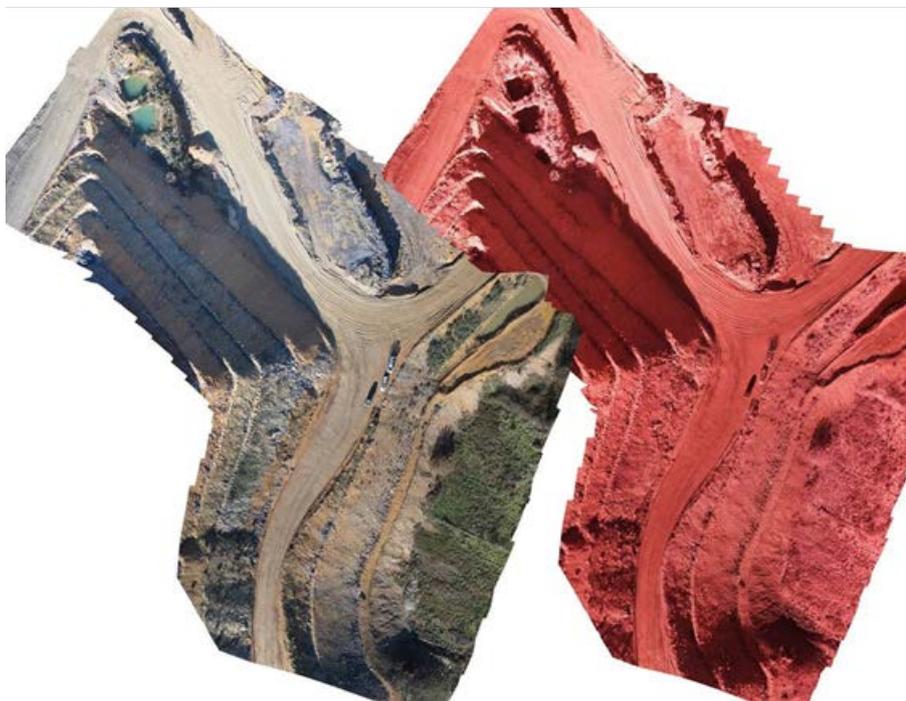


Ilustración 6.63. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

A continuación se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes de *Juniperus communis* (enebro) para demostrar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (columna izquierda), vigorosa (columna central) y poco vigorosa (columna derecha) (Ilustración 6.64).

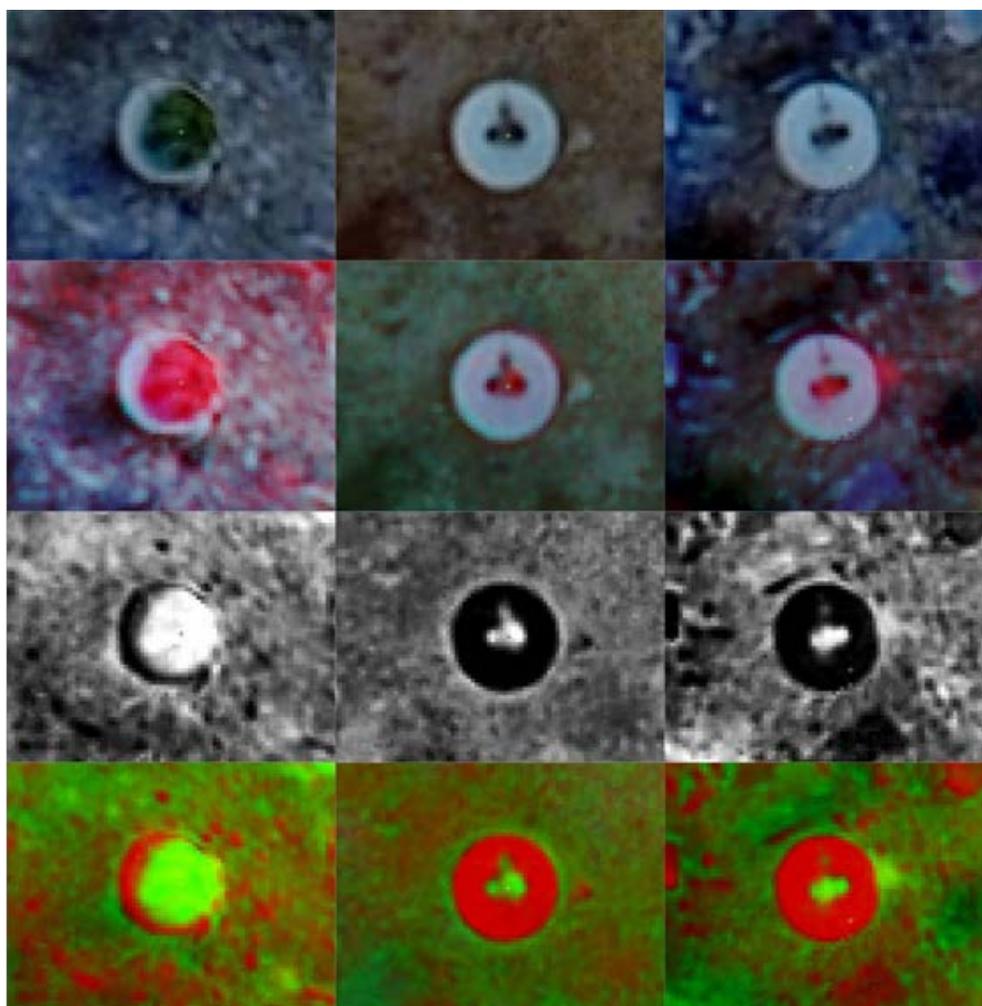


Ilustración 6.64. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes en *Juniperus communis* (enebro). Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: Visible, Composición 4-3-2, Green NDVI, ACP

El estado de las plantas puede ser extraído correctamente a partir de los índices Green NDVI y ACP aunque es importante señalar que el deficiente solape puede generar dudas en algunos casos. En la fila con el tratamiento ACP, el aspecto es diferente a nivel del tratamiento en otras parcelas debido a las condiciones de luminosidad, ya que la muestra se tomó en la parte del bancal que está en la sombra.

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo se han obteniendo los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 207 Waterboxx.
 - Plantas vivas: 192.
 - Waterboxx dudosos: 15.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 0.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 15.
 - Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 20, Anejo 5.6.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que todos los plantones dudosos son marras (acierto) y que el resto de plantas están vivas (acierto).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total de plantas analizadas: 7.3% (15/207) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 100% (207/207).

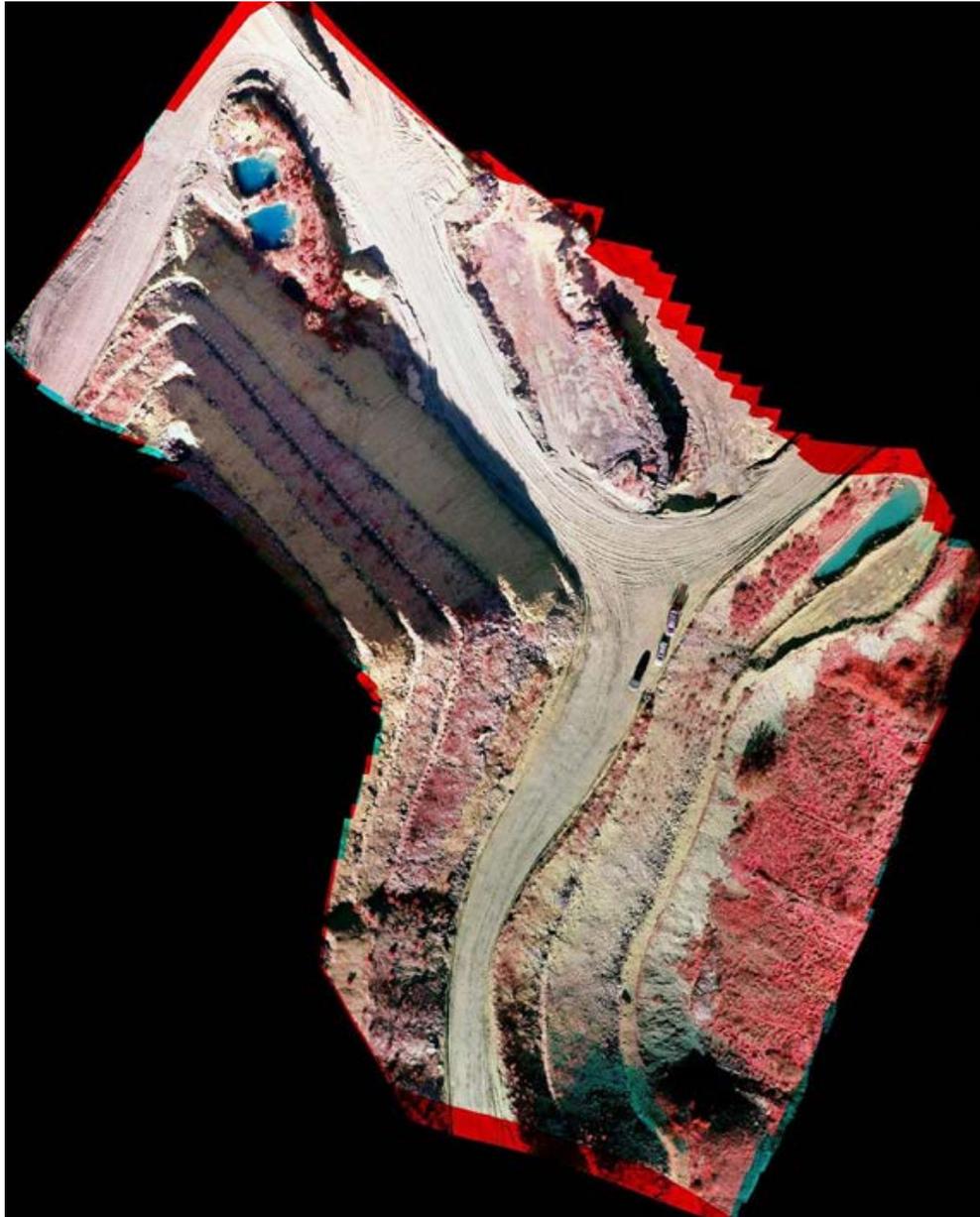


Ilustración 6.65. Composición 4/3/2

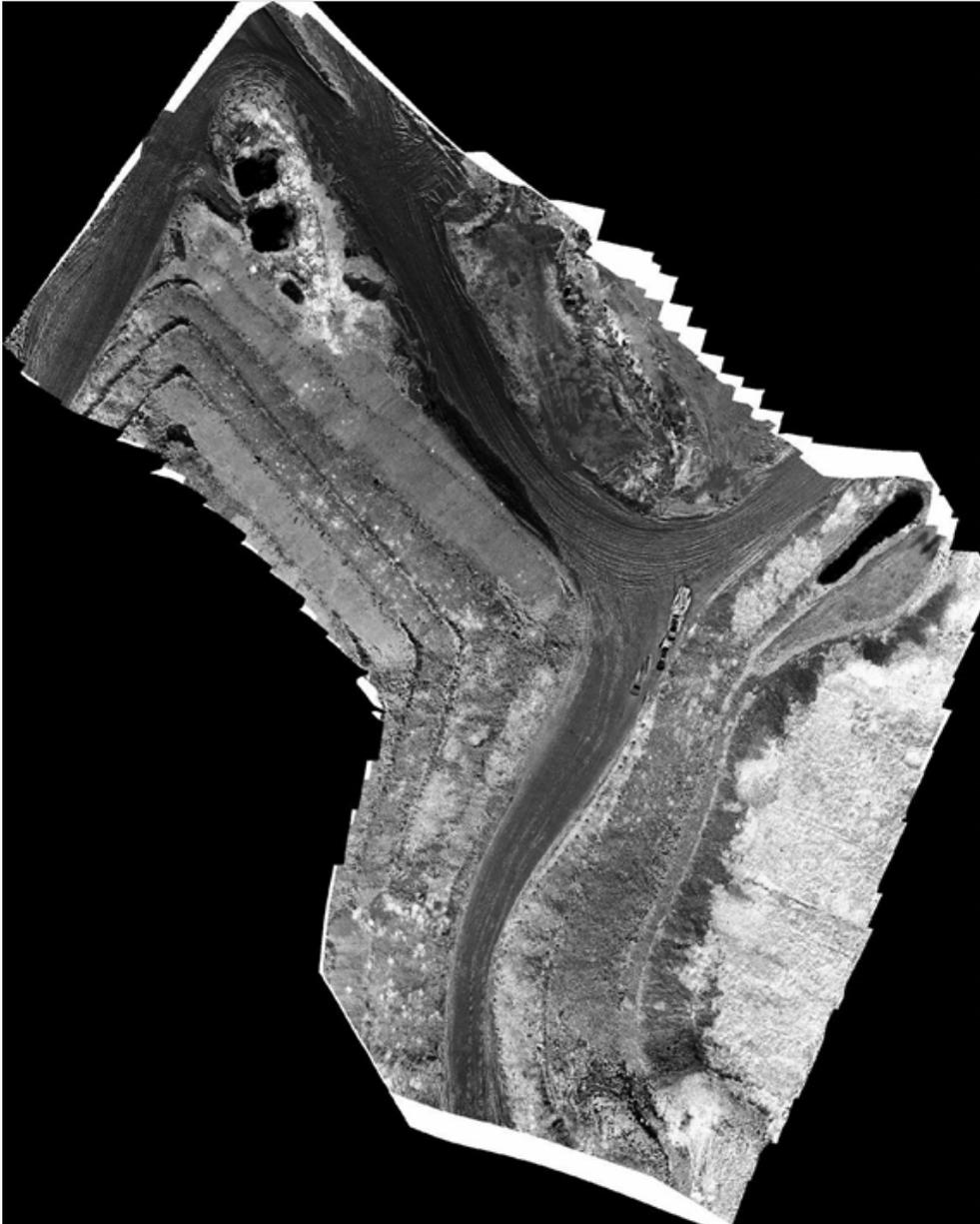


Ilustración 6.66. Índice Green NDVI

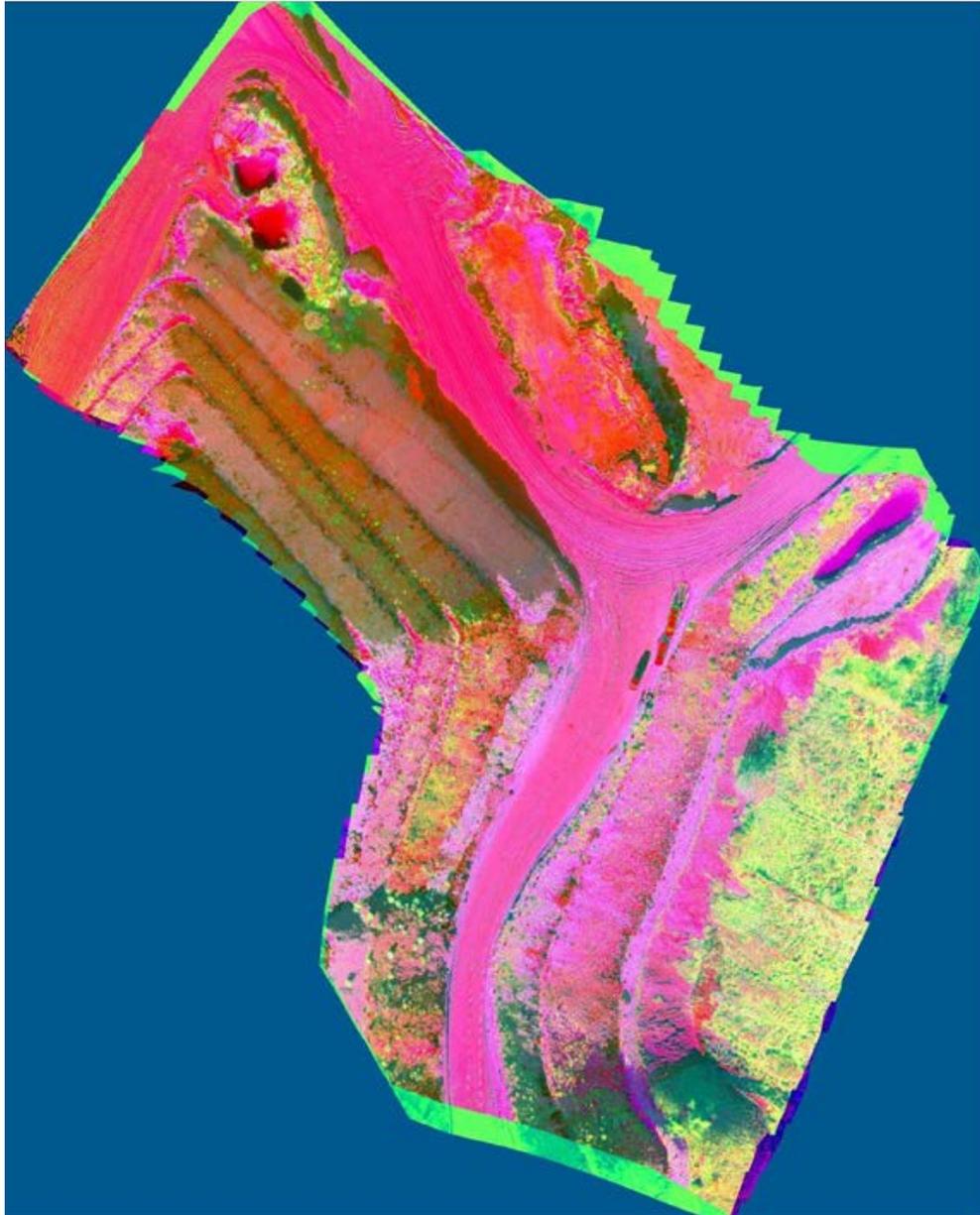


Ilustración 6.67. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.2.9. Resultados del duodécimo vuelo en Pedrajas de San Esteban (Valladolid). Año 2015

Se realizaron un total de 62 fotografías con la cámara RGB y 59 con la cámara IRc. La altura de vuelo media es de 106 m, con lo que se obtiene una resolución sobre el terreno de 0.026 metros/píxel. Se tomaron 11 puntos de control, pero únicamente se emplearon 9 para georreferenciar la parcela. La superficie total modelada representada en la ortofoto es de 6.7 ha (Ilustración 6.68), y los Waterboxx están se encuentran muy dispersos.



Ilustración 6.68. Ejemplo de fotografía capturada en Visible/RGB (izquierda). Ejemplo en IRc (derecha)

Tras la creación de las ortofotos en IRc y RGB se comprueba que el solape es correcto y que la desviación no supera el píxel (2.6 cm), suficiente para obtener resultados de gran calidad (Ilustración 6.69).

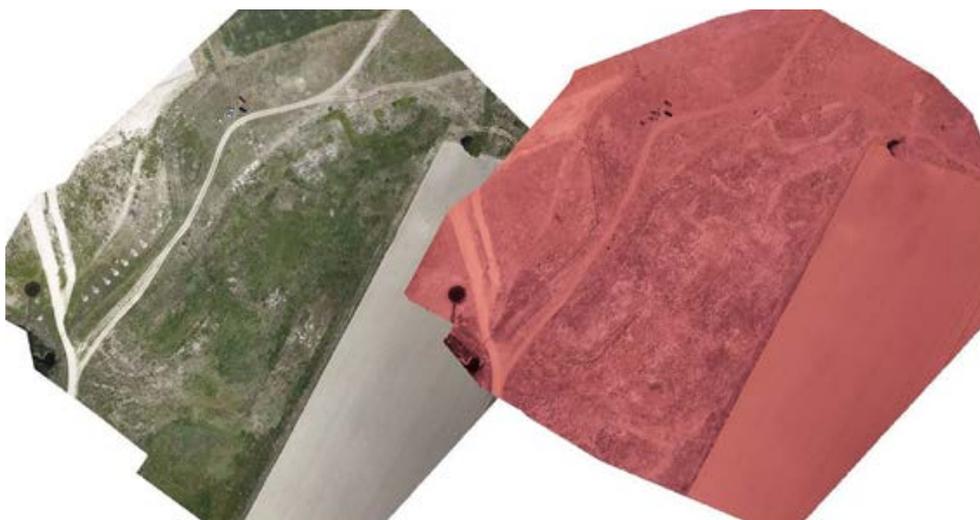


Ilustración 6.69. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

A continuación se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes para demostrar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (columna izquierda), vigorosa (columna central) y poco vigorosa (columna derecha) (Ilustración 6.70).

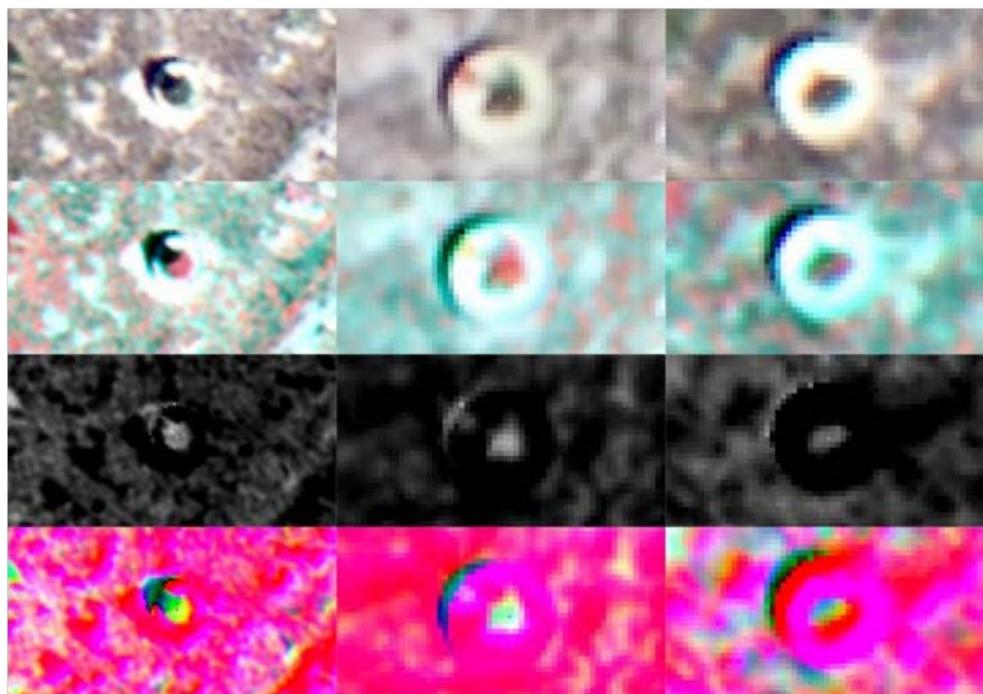


Ilustración 6.70. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes. Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: Visible, Composición 4-3-2, Green NDVI, ACP

El estado de las plantas puede ser extraído, tal y como se ve en la imagen, a partir de los índices Green NDVI y ACP sin problemas (ilustraciones 6.71, 6.72 y 6.73).

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo se han obtenido los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 139 Waterboxx.
 - Plantas vivas: 127.
 - Waterboxx dudosos: 12.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 0.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 12.
 - Plantas muertas: 0.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 21, Anejo 5.7.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que todos los plantones dudosos son marras (acierto) y que 5 plantas dadas como vivas eran falsos positivos (error).

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 8,6% (12/139) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total de plantas analizadas): 96.4% (134/139).

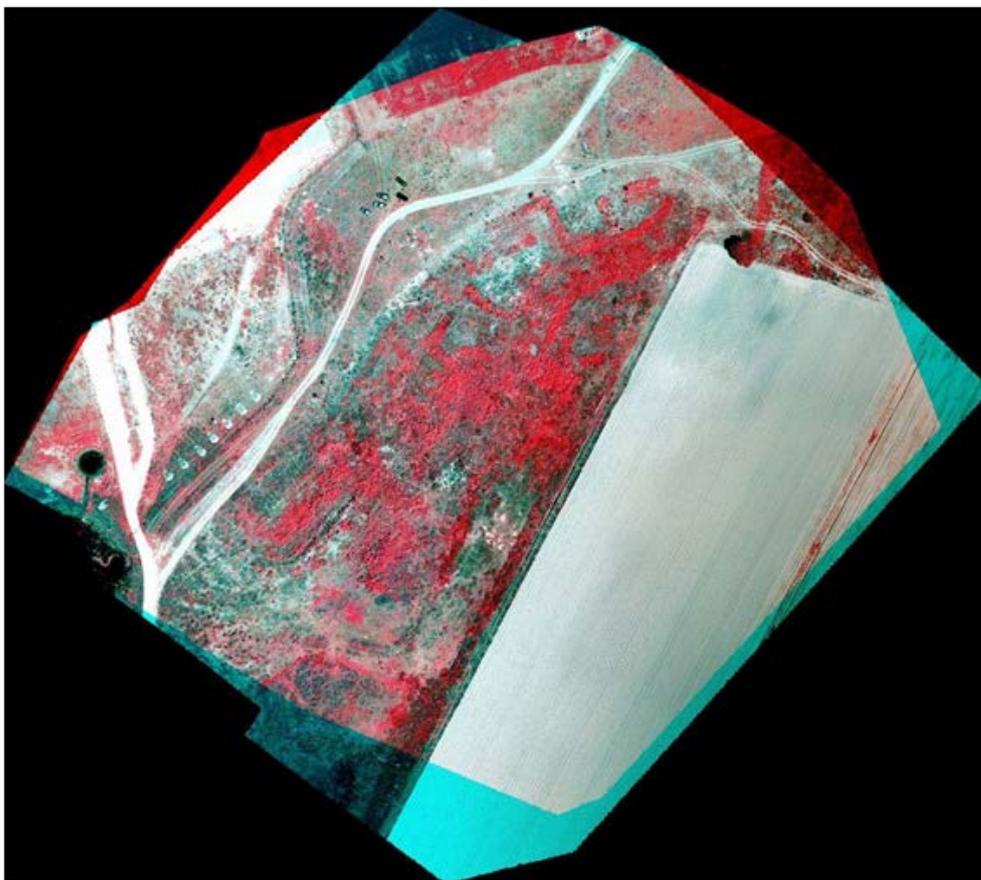


Ilustración 6.71. Composición 4/3/2

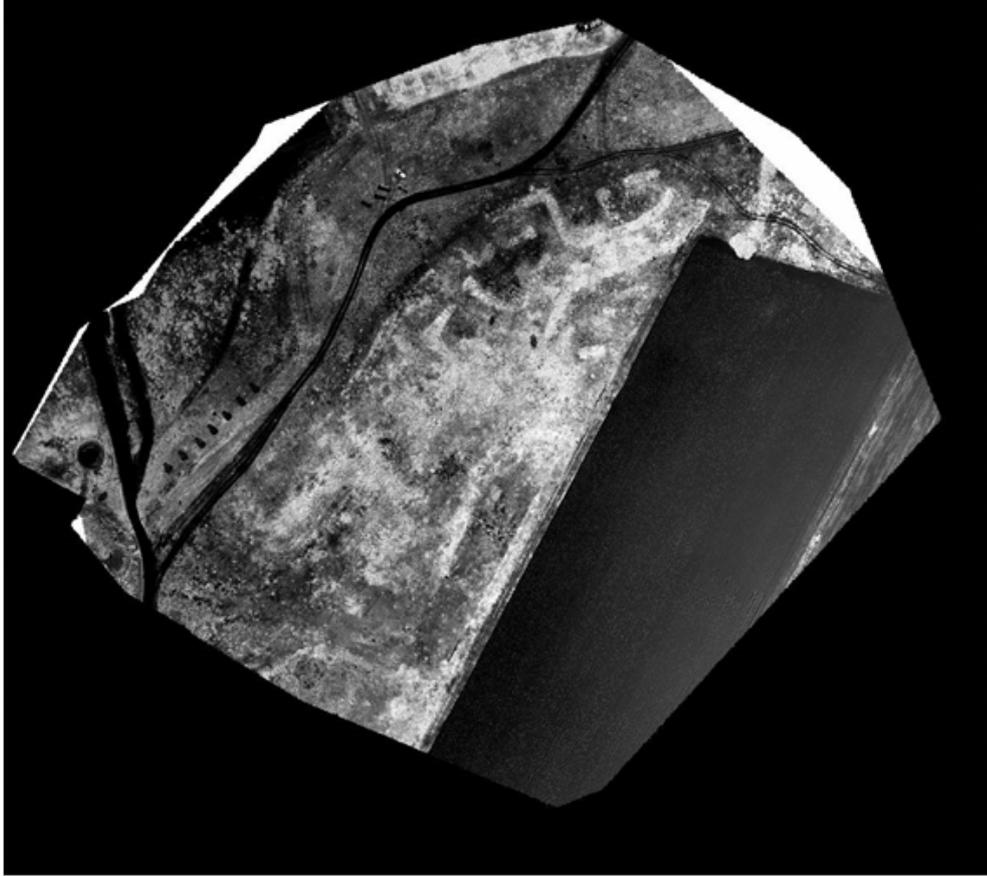


Ilustración 6.72. Índice GreenNDVI

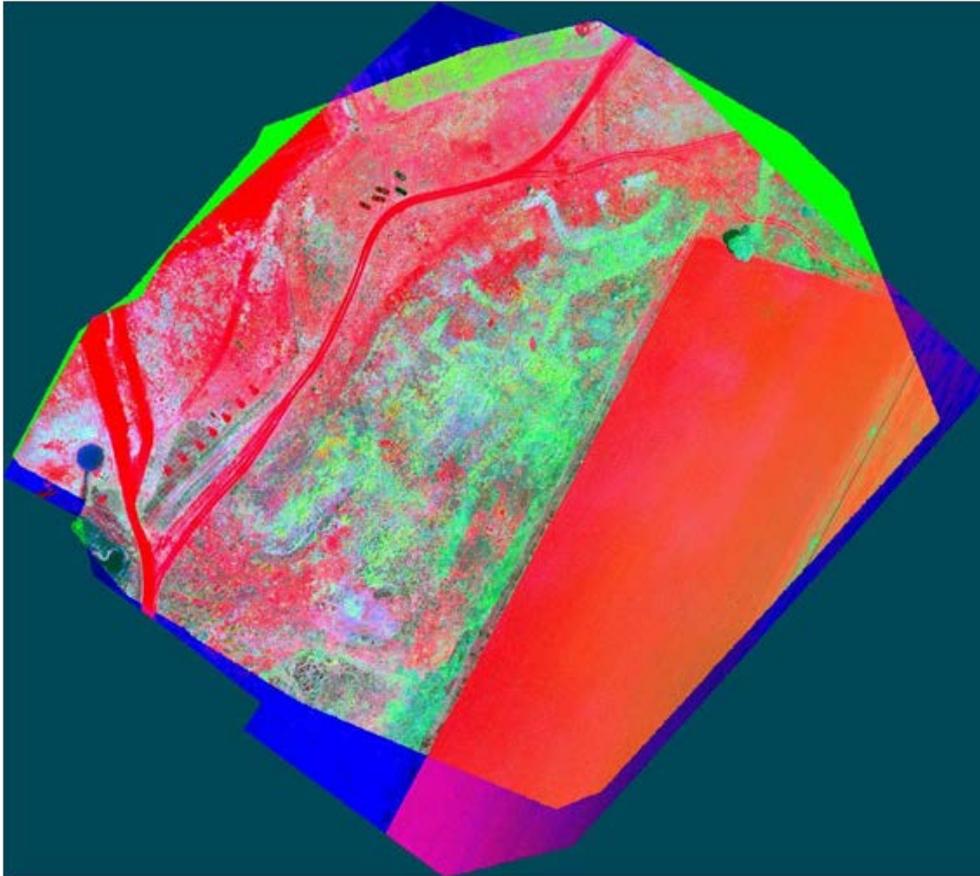


Ilustración 6.73. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.3. RESULTADOS CON CÁMARA COMPACTA RGB Y CÁMARA MULTIESPECTRAL DE UN SENSOR (ADC MICRO) + ALA FIJA (SKYWALKER KIT)

6.3.1. Resultados del décimo tercero vuelo en San Mateo de Gállego (Zaragoza). Año 2015

Se realizaron un total de 403 fotografías con la cámara multiespectral, de las cuales se emplearon 269 para generar el ortomosaico. Por otro lado, con la Canon A810 se tomaron 401 fotografías y se utilizaron todas para crear el modelo 3D. La altura de vuelo media es de 126 m, con lo que se obtiene una resolución sobre el terreno de 0.031 metros/píxel (Ilustración 6.74). Se tomaron 11 puntos de control (PC) en la zona (anejo 3).



Ilustración 6.74. Ejemplo de fotografía capturada en visible/RGB (izquierda) e IRc (derecha)

Tras la creación del ortomosaico en IRc/R/G con ayuda del Pix4DMapper y la ortofoto en RGB, con el Agisoft PhotoScan, se comprueba que el primero presenta un ajuste correcto al segundo. En este caso, el ajuste no debe ser tan fino como en el método anterior (apartado 6.2), ya que trabajamos de forma independiente con el ortomosaico aunque podemos chequear la calidad del mismo, puesto que la orientación externa de imágenes multiespectrales con *software* de fotogrametría suele presentar errores. En este caso, el análisis visual por comparación (por superposición) entre el ortomosaico y la ortofoto RGB es correcto (Ilustración 6.75).



Ilustración 6.75. Conjunto de imágenes en visible/RGB (izquierda) y en IRc (derecha)

Tras generar el archivo PIX a partir del ortomosaico con el *software* PCI-Geomática, se determinan los índices Green NDVI y ACP.

A continuación se muestran tres ejemplos de los tratamientos digitales realizados en tres tipologías de plantas diferentes de *Pinus halepensis* (pino) para demostrar cómo se comportan los índices en cada caso: muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha) (Ilustración 6.76).

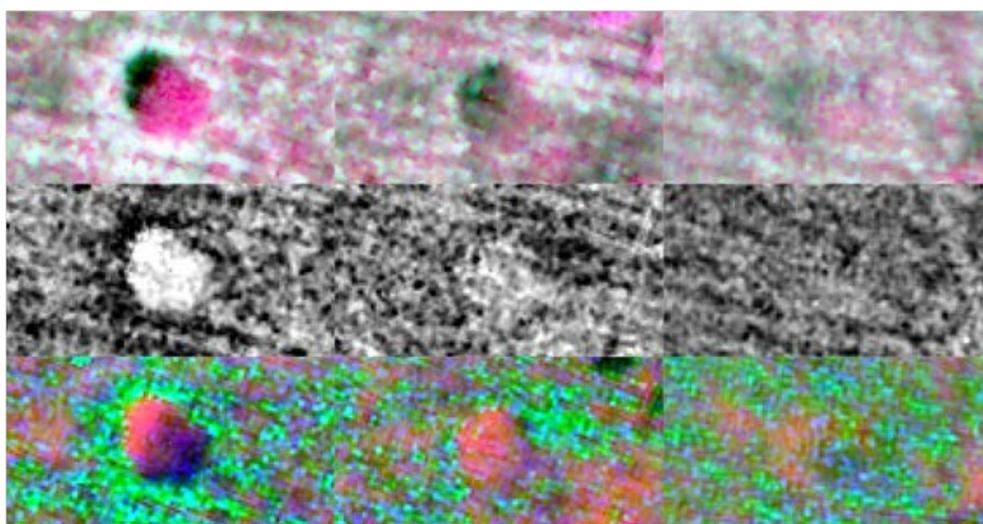


Ilustración 6.76. Tratamientos digitales realizados en 3 tipologías de plantas diferentes para *Pinus halepensis* (pino). Cada columna representa una planta. Muy vigorosa (izquierda), vigorosa (centro) y poco vigorosa (derecha). De arriba abajo: composición 4/3/2, Green NDVI, ACP

Al presentar la mayoría de las plantas un estado fenológico muy desarrollado (4 años tras la plantación en un clima caluroso), es fácil determinar sin problemas si las plantas están vivas o muertas a partir de los índices Green NDVI y ACP (Ilustraciones 6.77, 6.78 y 6.79).

Tras analizar las plantas con Waterboxx de la zona de vuelo se han obteniendo los siguientes resultados:

- Plantas analizadas: 125 Waterboxx.
 - Plantas vivas: 119.
 - Waterboxx dudosos: 1.
 - Tapados parcialmente por vegetación: 0.
 - Respuesta débil, invasión de otras especies o marra: 1.
 - Plantas muertas: 5.

Para una mayor concreción de los resultados, remitimos a la tabla 22, Anejo 5.8.

Cuando se toman los datos en el campo se contrastan los resultados y se comprueba con GPS que el plantón dudoso es una marra (acierto) y que una planta dada como viva era un falso positivo (error). Las plantas muertas están bien determinadas.

Con estos datos calculamos el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado: 0,8% (1/125) y el índice de Exactitud Global (número total de aciertos / total): 99.2% (124/125).

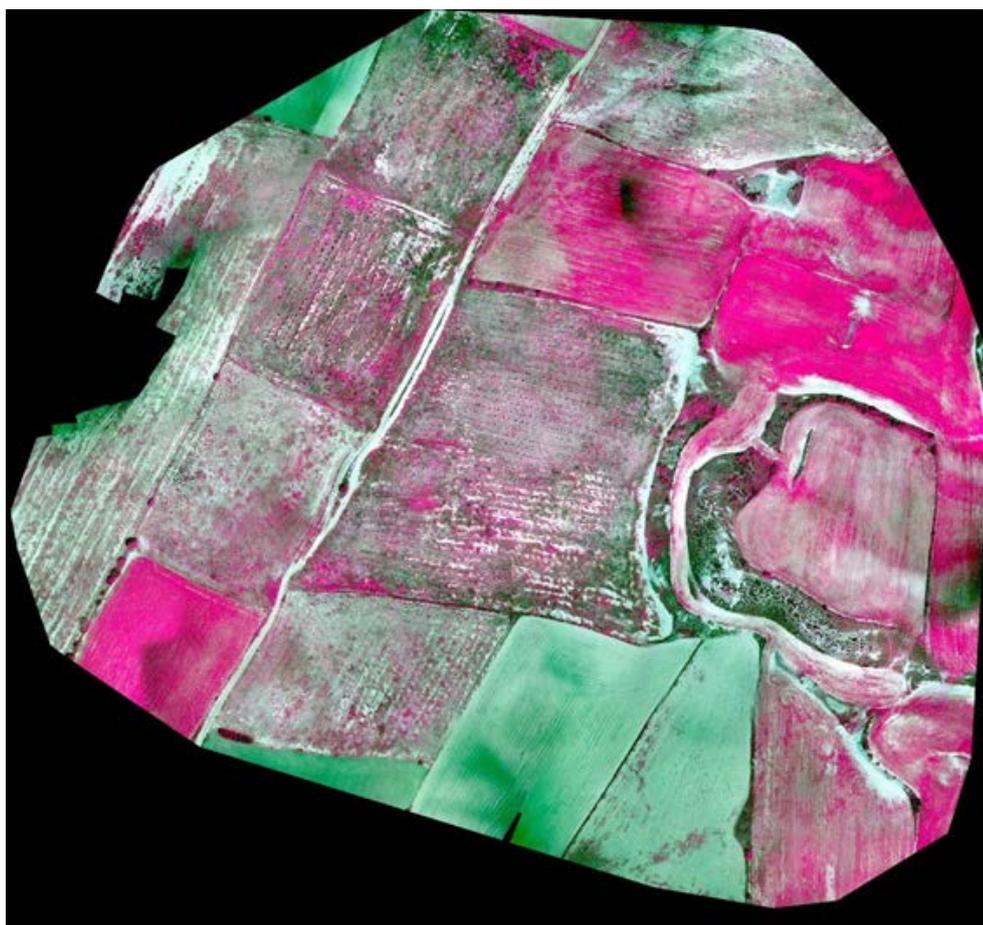


Ilustración 6.77. Composición 4/3/2

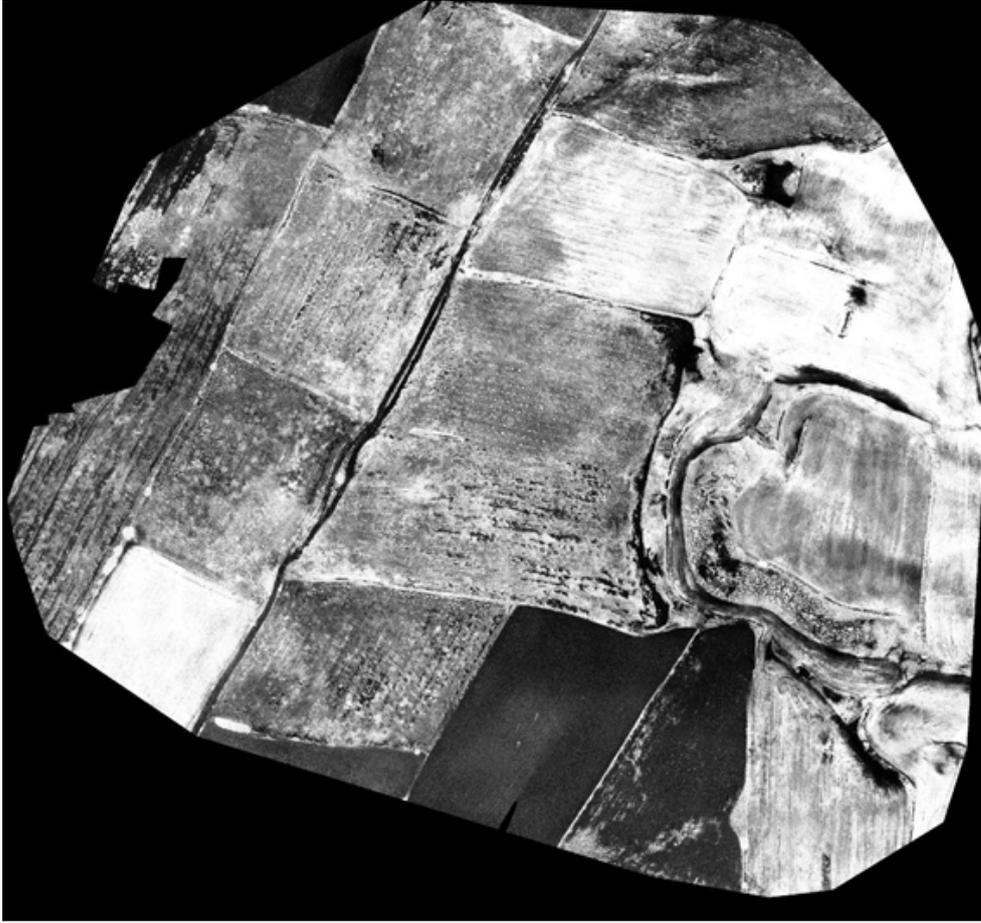


Ilustración 6.78. Índice Green NDVI

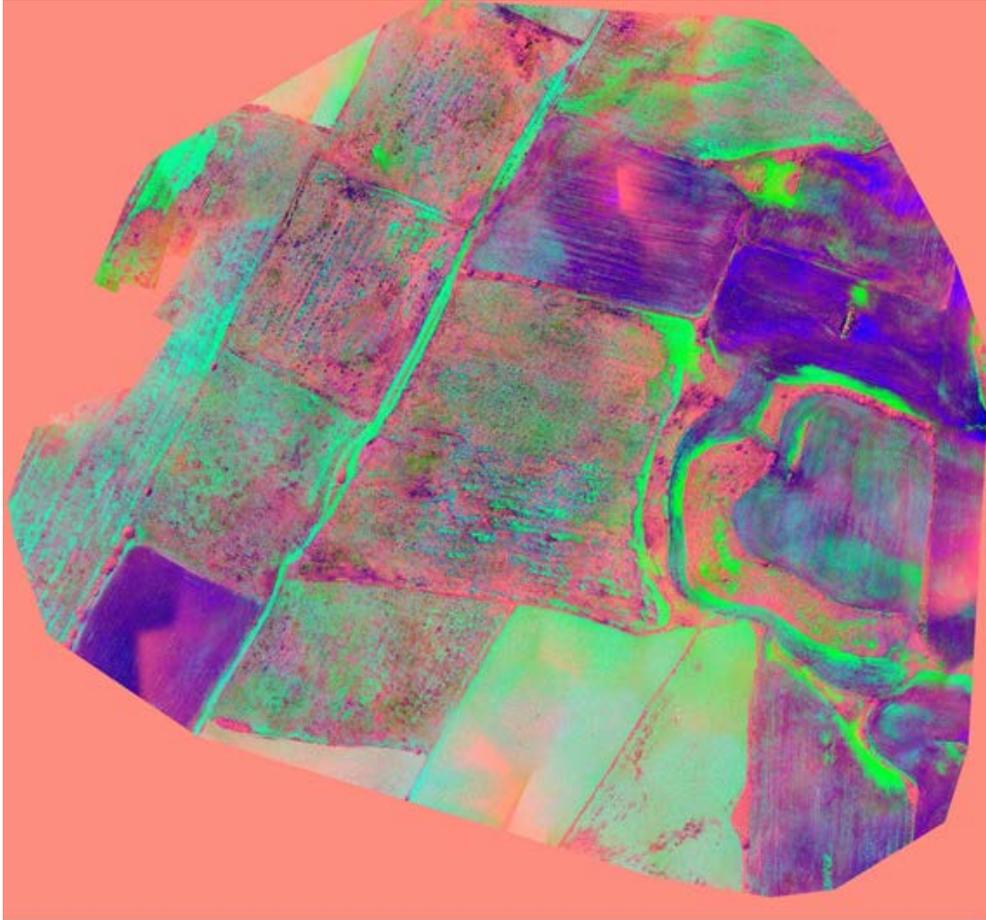


Ilustración 6.79. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.3.2. Resultados de los décimo cuarto y décimo quinto vuelos en la Finca de Matallana 2 y en La Mudarra (Valladolid). Año 2015

Al igual que la parcela de San Mateo, las parcelas de Matallana y La Mudarra se volaron con el dron de ala fija Skywalker Kit. Las características del vuelo en ambos casos, con alturas de más de 200 metros imposibilitan el uso de los ortomosaicos para realizar el estudio de marras. Esto se debe principalmente al tamaño del píxel sobre el terreno, cercano a los 6.5 cm (debido en parte a la baja resolución de la cámara multiespectral), que permite apreciar la posición del Waterboxx pero no la vegetación presente en su interior (de muy poco porte en ambas parcelas pues son las plantaciones más recientes).

6.4. RESULTADOS FINALES

A continuación representamos en la tabla 6.12, a modo de resumen, los datos más significativos de cada vuelo: la altura nominal media de vuelo, la huella de pixel en el terreno, el número de imágenes tomadas, el área modelada, los puntos de control empleados para la georreferenciación y el número de Waterboxx analizados.

Además, en la tabla 6.13 podemos comprobar el índice de Exactitud Global y el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado de cada ensayo, agrupados en función del método empleado y por orden cronológico.

En los experimentos iniciales con la cámara multiespectral de 6 canales se interpretaron las imágenes analizadas determinando directamente las plantas vivas y muertas. Sin embargo, desde el empleo de la doble cámara en el año 2013, se ha calculado el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado. Este factor implica que solamente debemos ir al campo a verificar las plantas dudosas, y que en el montante global representan el 4% (59/1476) del total de las analizadas. El resto de las plantas monitorizadas se pueden dar por válidas ya que la fiabilidad de la metodología es muy elevada según se puede comprobar en el índice de Exactitud Global general, que es del 98.0% (1655/1685). Por métodos, esta fiabilidad es mayor en el método de la doble cámara y en el método de la cámara multiespectral de un sensor (>99%), frente a un 92% de la Tetracam de 6 canales.

Como los ortomosaicos están georreferenciados, conocemos la posición geográfica de todos los Waterboxx (ver tablas del anejo 5) y únicamente necesitamos desplazarnos con un GPS de precisión submétrica a tiempo real para comprobar los plantones dudosos. Esto supone una altísima reducción del trabajo de campo.

Tabla 6.12. Datos significativos de cada vuelo

AÑO DE VUELO	T.M.	RPA	SENSOR	CÁMARA	ALTURA NOMINAL	HUELLA DE PIXEL(cm/pixel)	NÚMERO DE IMÁGENES	ÁREA MODELADA (ha)	PUNTOS DE CONTROL	WATERBOX ANALIZADOS
2011	VILLARRAMIEL	MD4-1000	MINI MCA-6	Multi 6c	13.7-18-22.5	ND	61-27-16	0.43	7	155
2012	SAN MATEO DE GÁLLEGO	Okto XL	MINI MCA-6	Multi 6c	15	ND	262	1.41	6	54
2013	SOTO DE CERRATO	MD4-1000	MINI MCA-6	Multi 6c	ND					
2013	SOTO DE CERRATO	MD4-1000	PEN E-P1	RGB	66.4	2.05	56	3.38	8	
				IRc	68.29	2.20	55	3.77		
2013	SARRACÍN DE ALISTE	MD4-1000	PEN E-P1	RGB	62.08	2.00	60	2.53	9	
				IRc	59.77	1.93	62	2.57		
2013	FUENSALDAÑA	MD4-1000	PEN E-P1	RGB	56.83	1.54	90	0.89	9	175
				IRc	56.77	1.53		0.36		
2014	SOTO DE CERRATO	MD4-1000	PEN E-P1	RGB	63.36	2.00	173	3.86	6	175
				IRc	60.47	1.58		3.56		
2014	FUENSALDAÑA	MD4-1000	PEN E-P1	RGB	51.61	1.34	89	0.68	6(5)	291
				IRc	51.68	1.32		0.91		
2014	MATALLANA 1	MD4-1000	PEN E-P1	RGB	61.45	1.95	221	1.74	7(6)	232
				IRc		1.52		1.58		
2015	SAN ISIDRO	UFOCAM XXL8 V3	PEN E-P1	RGB	111.66	2.74	201	13.70	11(4)	132
				IRc	109.20	2.64	219	14.79		
2015	RIOFRÍO DE ALISTE	UFOCAM XXL8 V3	PEN E-P1	RGB	78.12	1.94	54	2.08	12	207
				IRc						
2015	PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN	UFOCAM XXL8 V3	PEN E-P1	RGB	106.91	2.60	62	6.67	11(9)	139
							59			
2015	SAN MATEO DE GÁLLEGO	SKYWALKER	ADC MICRO	Multi	126.89	3.15	403 (269)	18.03	11	125
2015	MATALLANA 2	SKYWALKER	ADC MICRO	Multi	205	4.53	403 (269)	48.01	11	0
2015	LA MUDARRA	SKYWALKER	ADC MICRO	Multi	215	6.41	415 (284)	94.18	11	0

Tabla 6.13. Exactitud Global y porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado en cada ensayo

AÑO DE VUELO	T.M.	EXACTITUD GLOBAL	PORCENTAJE DE PLANTAS DUDOSAS	RPA	SENSOR	MÉTODO	OBSERVACIONES
		%	%				
2011	VILLARRAMIEL	90.3% (140/155)	ND	MD4-1000	MINI MCA-6	CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES	No se determinó el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado
2012	SAN MATEO DE GÁLLEGO	98.1% (53/54)					
2013	SOTO DE CERRATO	-					
Subtotal		92.3% (193/209)					
2013	SOTO DE CERRATO	100%	0	MD4-1000	PEN E-P1	CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL	En los cerezos y nogales de bajo porte ha sido imposible la determinación de plantas vivas/marras
2014		100% (175/175)	1.1% (2/175)				
2013	SARRACÍN DE ALISTE	100%	0				
2013	FUENSALDAÑA	99.4% (174/175)	6.9% (12/175)				
2014		99.0% (288/291)	1.4% (4/291)				
2014	MATALLANA 1	99.6% (231/232)	3.0% (7/232)				
2015	SAN ISIDRO	97.7% (129/132)	4.5% (6/132)				
2015	RIOFRÍO DE ALISTE	100% (207/207)	7.3% (15/207)				
2015	PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN	96.4% (134/139)	8,6% (12/139)				
Subtotal		99.0% (1338/1351)	4.3% (58/1351)				
2015	SAN MATEO DE GÁLLEGO	99.2% (124/125)	0,8% (1/125)	SKYWALKER	ADC MICRO	COMPACTA RGB + CÁMARA DE UN SENSOR	No se pudo determinar debido a la excesiva altura de vuelo
2015	MATALLANA 2	ND	ND				
2015	LA MUDARRA						
Subtotal		99.2% (124/125)	0,8% (1/125)				
TOTAL	15	11	98.0% (1655/1685)	4% (59/1476)			

6.5. FACTORES DE ANÁLISIS

A continuación presentamos una serie de factores que hemos creído pueden tener mayor relevancia a la hora de obtener las conclusiones finales de nuestros ensayos y dar respuesta a los objetivos planteados. Para ello hemos utilizado el método del Análisis Multicriterio (Delgado & Cano, 2006), con la finalidad de discernir cuál de los tres métodos empleados en los diferentes ensayos va a obtener los mejores resultados para determinar el objetivo principal de la investigación.

El Análisis Multicriterio consiste en un método de evaluación de diferentes alternativas a partir de la definición de ciertos atributos o factores más relevantes en un determinado problema (Valpreda, 2007). Cada factor es valorado individualmente y la suma de todas las calificaciones nos determina el orden de las alternativas evaluadas.

Para ello, vamos a realizar una matriz multicriterio que va a tener dos entradas:

Por una parte las diferentes alternativas que vamos a evaluar y que están constituidas por los tres métodos propuestos en los ensayos y que recordamos seguidamente:

Método 1. Cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor.

Método 2. Cámara fotográfica convencional y modificada + multirrotor.

Método 3. Cámara compacta RGB y cámara multiespectral de un sensor + ala fija (Skywalker kit).

Y por otro lado elegiremos los diez factores que, tras el análisis de los resultados, hemos identificado como más relevantes para dar respuesta al objetivo principal y los objetivos específicos expuestos en el Capítulo 3 de esta Tesis Doctoral y que pasamos a explicar individualmente:

Referente a la tipología de planta:

Este factor nos permite la discriminación entre plantas vivas y marras en Waterboxx. Es necesario comprender que metodología determina mejor unas u otras en función del tipo de planta, de su desarrollo fenológico, de su vigor vegetal y de su porte.

Referente a la detección sobre Waterboxx:

En este caso, intentaremos responder a la facilidad con que se pueden determinar marras teniendo en cuenta que las especies están plantadas dentro de un Waterboxx que está construido con unos materiales concretos y que presenta una respuesta espectral

determinada. No es lo mismo que una planta (viva o muerta) esté aislada, a que crezca rodeada de una caja de plástico. También es problemático dirimir si estamos o no ante una marra cuando los orificios centrales del Waterboxx nos pueden causar confusión en la respuesta.

Referente a la altura de vuelo:

Hemos reconocido la importancia del compromiso entre la altura de vuelo y el tamaño del sensor (Smith et al., 2009) para la obtención de una huella de pixel sobre el terreno correcta. Con este factor se atiende a las alturas nominales óptimas a las que se pueden conseguir nuestro propósito.

Referente al tipo de sensor:

El tamaño, peso, número de canales, resolución, ancho de banda y precio de las cámaras van a ser características decisivas que determinan el tipo de metodología y la combinación con el RPA más apropiado.

Su precio es muy alto y ronda los 13.200 euros. Actualmente todavía aparece en catálogos, aunque es una cámara ya obsoleta.

Referente al conjunto aeronave + sensor:

El tándem tipo de aeronave - tipo de sensor puede dar mejores o peores resultados tanto a nivel de calidad de las imágenes recogidas como de la eficiencia y operatividad de la tecnología empleada.

Referente a los tratamientos digitales:

Con las imágenes obtenidas por los diferentes métodos empleados es necesario identificar las marras y las plantas vivas. Estas imágenes se tienen que procesar con *software* especializado hasta dejarlas operativas para el análisis visual. Con este factor se evalúa la mayor o menor dificultad de estos procesos y los que han obtenido mejores resultados.

Referente al software empleado:

Para realizar todos estos tratamientos se especifican los programas necesarios, su posibilidad de automatización y su mayor o menor dificultad de aplicación.

Referente a la eficiencia del método:

Cualquiera de los métodos ensayados puede tener mejores o peores resultados pero es muy importante resumir el grado de dificultad de todo el proceso para determinar tanto si es viable técnicamente como rentable económicamente.

Referente al tamaño de las parcelas:

En los diferentes ensayos de la investigación se han monitorizado parcelas más grandes y otras de menor superficie. El tipo de RPA, en combinación con el tipo de sensor, determina qué superficies medias son óptimas en cada sistema.

Referente a la exactitud en el cálculo de marras (aciertos/ total):

La operatividad y la eficiencia son esenciales para que un sistema sea rentable, pero de nada sirve si el porcentaje de éxito en la determinación tanto de marras como de plantas vivas no es suficientemente alto. Por otra parte un sistema muy preciso puede no ser operativo. Al analizar los resultados se pueden comprobar con cuál de ellos alcanzamos mayor exactitud.

6.5.1. Método 1: cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor

Referente a la tipología de planta:

Es muy difícil detectar plantas vivas de porte bajo (< 25 cm) a menos que volemos por debajo de 13.7 m. En estos casos es preferible detectar marras. Sin embargo es factible identificar plantas vivas cuando tienen un alto grado de vigor vegetal volando a más altura (22.5 metros).

Referente a la detección sobre Waterboxx:

La detección de plantas vivas en Waterboxx no ofrece demasiada dificultad cuando el porte es medio/alto y/o la planta tiene follaje denso. En caso de marras y plantas de pequeño porte, los orificios centrales interfieren y se confunden con las plantas vivas, por lo que es preferible identificar las marras en estos casos.

Referente a la altura de vuelo:

Durante el ensayo previo al primer vuelo se pudo comprobar que el rango de altura óptimo para monitorizar plantones en Waterboxx con este tipo de sensores está entre los 10 y 20 metros de altura nominal.

Para las plantas de escaso porte (< 25 cm) pero elevado vigor vegetal y con grandes hojas verdes como el castaño y abedul, se pueden determinar si están vivas con vuelos de hasta 22.5 m de altura, pero para plantas de pequeño porte y hoja más estrecha como el pino y la encina, el porcentaje de éxito en la identificación es elevado si no sobrepasamos los 13.7 m. A mayor altura es prácticamente imposible su determinación. En plantas de mayor talla (> 40 cm) y gran vigor vegetal, como la acacia, es posible identificar las vivas a una altura de 15 m. Las marras se detectan con dificultad por lo que es mejor utilizar la altura menor de vuelo con filtro Sobel.

Referente al tipo de sensor:

La cámara multiespectral de 6 canales presenta graves complicaciones. Necesitamos realizar su alineación para cada altura de vuelo, pre-procesar y tratar digitalmente 6 imágenes. Por su escasa resolución no admite alturas de vuelo medias, más bien bajas.

Las vibraciones provocadas por el motor pueden provocar efectos no deseados como “*rolling-shutter*” que provoca imágenes deformadas en forma de óvalo.

El viento puede complicar gravemente la adquisición de datos. Las imágenes presentan cierta inclinación o incluso menor (o desigual) recubrimiento del deseado, lo que va a repercutir también en una incorrecta generación del mosaico. Este tipo de sensor es muy sensible a este problema meteorológico.

La exposición de algunos de los sensores puede ser incorrecta, lo cual provoca fotografías “quemadas” y graves diferencias radiométricas.

El precio de las dos cámaras es bajo, 2450 euros. La cámara está descatalogada, pero la equivalente en la actualidad presentaría un coste similar aunque naturalmente con mejores características técnicas.

Referente al conjunto aeronave + sensor:

Hemos detectado una incompatibilidad operativa en la mencionada combinación (aeronave + sensor). Por un lado la escasa resolución de los sensores y, por otro lado, la inestabilidad de los RPA, sobre todo en días con viento, provocan un elevado porcentaje de fotografías movidas e inútiles.

Además la vibración de los motores transmite un efecto de *rolling-shutter* que provoca un aspecto vibrado en las imágenes haciendo que muchas sean defectuosas.

En el tercer ensayo no se pudieron obtener conclusiones debido a los múltiples problemas que nos estaba proporcionando la combinación cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor y se decidió abandonar este método para pasar a uno más operativo.

Referente a los tratamientos digitales:

En las plantas de hojas grandes como el castaño, abedul y acacia se puede determinar si planta está viva con cualquiera de los tratamiento efectuados: NVDI, SAVI, Green NDVI y ACP pero en el caso de plantas con menor vigor y tamaño de hoja (caso del pino y encina) es preferible detectar las marras empleando técnicas de mejora de contraste como el filtro Sobel y ACP.

En zonas áridas y especies de mayor porte (> 40 cm) y vigor vegetal, como por ejemplo la acacia, se identifican mejor las plantas vivas con el índice SAVI y el ACP.

Referente al software empleado:

El software PCI Geomática con algoritmos como el ACP y filtros de realce permite fotointerpretar el mosaico con total fiabilidad.

Referente a la eficiencia del método:

El proceso de creación y georreferenciación de mosaicos es tedioso y poco operativo en situaciones de conteo masivo con gran número de imágenes. Sería preferible poder trabajar a mayor altura, porque sería menor el volumen de datos y, por lo tanto, disminuiría el trabajo de gabinete en el procesado y análisis de las imágenes.

En el tercer ensayo no se pudieron obtener conclusiones debido a problemas en la combinación cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor.

Referente al tamaño de las parcelas:

Con el empleo de este método, que se ha probado en tres ensayos y en tres parcelas diferentes, se ha comprobado que únicamente es viable en parcelas de pequeño tamaño (inferiores a 0.25 ha). A mayor superficie el elevado número de fotos, la escasa autonomía de vuelo de los multirrotos y el costoso proceso de obtención y georreferenciación de los mosaicos la hacen poco operativa.

Referente a la exactitud en el cálculo de marras (aciertos/ total):

El porcentaje de aciertos en castaño, pino, encina, abedul y ciprés superó el 90% en el primer ensayo. En la acacia, en el segundo ensayo, superó el 98%. El porcentaje global de aciertos fue del 92.3%. En el tercer ensayo se abandonó este método. Pese a todo, esta combinación permite obtener resultados muy satisfactorios en cuanto a índice de aciertos.

6.5.2. Método 2: cámara fotográfica convencional y modificada + multirrotor

Referente a la tipología de planta:

Es relativamente sencillo detectar plantas vivas en plantas muy vigorosas o de vigor medio, utilizando los tratamientos digitales apropiados.

Es posible diferenciar, con dificultad, si una planta está tapada parcialmente por la vegetación o si se trata de una marra aunque, para eliminar dudas, sería conveniente la utilización de una técnica de filtraje tipo Sobel o efectuar la visita a pie de campo para comprobar con exactitud aquellas que sean dudosas.

Referente a la detección sobre Waterboxx:

El Waterboxx dificulta la labor de identificación de las plantas poco vigorosas, al presentar una respuesta espectral similar en los orificios centrales. Sin embargo, en las plantas muy vigorosas ayuda porque es muy fácil identificar las cajas por su color rojo cuando están tratadas con ACP que contrasta notablemente con el verdor de las hojas.

Referente a la altura de vuelo:

Los vuelos se realizaron en un rango de altura nominal de 55–65 metros en la mayoría de los ensayos. A esta altura se pueden identificar perfectamente las plantas vivas de las muertas al obtener en el terreno una huella de pixel media próxima a los 0,02 metros/pixel con un solape mínimo, longitudinal y transversal del 70% y 40% respectivamente.

En el caso de las dudosas y/o marras, y de especies muy poco vigorosas podría bajarse la altura de vuelo aunque, si son pocas las plantas afectadas, se estima innecesario. Esto se debe a que con el paso de los años, las plantas dudosas se van definiendo, o bien presentan algún tipo de vigor o simplemente se fotointerpreta el Waterboxx con la marra.

Referente al tipo de sensor:

El dúo cámara convencional RGB/IRc es muy fiable por su buena resolución que nos permite unas alturas nominales medias/altas. El mayor inconveniente es el peso de ambas

cámaras, que obliga a emplear un multirrotor. De todos modos, la tendencia actual de la tecnología solventa este problema al aparecer modelos en el mercado muy ligeros y de mayor resolución.

Referente al conjunto aeronave + sensor:

Para todos los ensayos utilizamos multirrotor de 4 o de 8 rotores. La razón principal fue el peso a transportar. El resultado fue un conjunto sólido que no dio demasiados problemas y con resultados muy fiables en la mayor parte de los casos. Para ello hubo que adaptar un gimbal especial que diese soporte a las dos cámaras de manera sincronizada para que las capturas se realizaran en el mismo instante. Esto nos va a permitir que las proyecciones de las plantas sean coincidentes y se puedan realizar los análisis de manera correcta.

Referente a los tratamientos digitales:

En las plantas muy vigorosas, tanto el índice Green NDVI como el ACP permiten identificar sin problemas las plantas vivas de las muertas.

En el caso de las dudosas se podría tratar de emplear una técnica de filtraje o de elevación de contraste para intentar mejorar la respuesta espectral. En estos casos, el tratamiento más fiable fue el ACP.

Referente al software empleado:

La combinación Agisoft PhotoScan (para la obtención de MDT de alta precisión con los que obtener las ortofotos) y PCI-Geomática (para el posterior tratamiento digital) es muy fiable (los ortomosaicos generados solapan perfectamente) y altamente productiva.

Referente a la eficiencia del método:

El proceso es muy simple; en el caso de PhotoScan, está semi-automatizado y para el tratamiento digital y posterior análisis con PCI-Geomatica, el método empleado permite muy buenos resultados en tiempo y recursos utilizados, lo que le hace altamente eficiente.

El mayor problema se puede dar en el caso de la generación de MDT que no solapen correctamente. Esto podría ocurrir en el caso de tomar un número suficiente de puntos de control. Se ha comprobado que en parcelas de tamaño medio es necesario al menos 10 puntos para generar el ortomosaico con la suficiente precisión.

Referente al tamaño de las parcelas:

Después de probar el sistema en 7 parcelas de diferente tamaño, se ha comprobado que es viable y eficiente en parcelas de tamaño medio (entre 2 y 6 ha), aunque la tendencia actual en la reducción de pesos y el aumento de la autonomía de los RPAS hace que se pueda pensar, en un futuro inmediato, en parcelas de mucha mayor superficie.

Referente a la exactitud en el cálculo de marras (aciertos/ total):

El empleo de este método en los 9 ensayos realizados nos permite ir directamente a verificar sólo aquellas plantas que muestran duda y que representan el 4.3% respecto del total de las plantas muestreadas con Waterboxx. En el resto de las plantas muestreadas se ha verificado una Exactitud Global de un 99%. Ello supone una altísima reducción del trabajo tradicional a pie de campo.

6.5.3. Método 3: cámara compacta RGB y cámara multiespectral de un sensor + ala fija (Skywalker kit)

Referente a la tipología de planta:

En plantas con un desarrollo fenológico alto (en nuestro caso pinos de 4 años) es factible diferenciar las plantas vivas de las marras porque las respuestas espectrales en ambos casos son muy diferentes.

Las plantas menos vigorosas o las que tienen un porte medio/bajo no se pueden diferenciar debido a la altura de vuelo (demasiado elevada para la resolución espacial del sensor).

Referente a la detección sobre Waterboxx:

Los Waterboxx sólo se distinguen en plantas muertas (marras), en las vivas el desarrollo de la planta provoca una respuesta espectral clara.

Referente a la altura de vuelo:

Los vuelos se realizaron en un rango de altura nominal próxima al límite establecido por la ley (alrededor de 120 metros). Con esta altura nominal la huella de pixel es aproximadamente de 3.1 cm/pixel (suficiente para plantas bien desarrolladas).

Al analizarse un único ortomosaico, no es necesario un ajuste tan exacto como en la tecnología de la doble cámara, y no es necesario un número tan elevado de puntos de control.

Referente al tipo de sensor:

El sensor multiespectral es ligero y tiene poca resolución espacial (3.2 Megapíxeles) lo cual supone un inconveniente para la altura de vuelo nominal que debería llevar un ala fija.

Su precio actual es medio/bajo, aproximadamente 4500 euros.

Referente al conjunto aeronave + sensor:

El conjunto es sólido y está bien construido (viene de fábrica en forma de kit), es muy válido para la obtención de MDT de zonas amplias, pero se queda algo corto para vuelos más elevados.

El conjunto es fiable, aterriza y despegue correctamente y el autopiloto y el control de vuelo, totalmente autónomo, hacen que no sea de difícil manejo.

Referente a los tratamientos digitales:

Con los tratamientos digitales Green NDVI y ACP es como se obtienen los mejores resultados de identificación de plantas vivas y de marras.

Las plantas dudosas y/o tapadas por la vegetación es necesario que se identifiquen a pie de campo.

Las plantas de bajo porte no son identificables con ningún tratamiento digital, incluidas las técnicas de filtraje.

Referente al software empleado:

La combinación Agisoft PhotoScan / PCI-Geomatica funciona sin problemas de manera semiautomática y es altamente productiva.

Referente a la eficiencia del método:

El proceso es muy simple, se obtiene el MDT con los puntos de control y, a continuación, se genera el ortomosaico al que se aplican los tratamientos digitales.

Referente al tamaño de las parcelas:

Es una tecnología altamente eficiente. Es factible generar el MDT y la ortofoto en un único vuelo de un territorio de superficie mayor de 70 ha en un vuelo de 1 hora aproximadamente.

Referente a la exactitud en el cálculo de marras (aciertos/ total):

De los 3 ensayos realizados con esta tecnología, únicamente hemos podido obtener resultados concluyentes en una de ellas, la de mayor desarrollo vegetativo. En esta parcela el índice de exactitud supera el 99% de aciertos con un porcentaje de plantas dudosas inferior al 1%. Sin embargo en otras dos parcelas no ha sido posible la identificación de las marras por no tener el suficiente desarrollo vegetal.

6.6. ANÁLISIS MULTICRITERIO

Con el fin de evaluar las tres alternativas, presentamos la matriz multicriterio (tabla 6.13). Esta evaluación se realiza en función de los factores más relevantes, señalados anteriormente. Las tres alternativas representan los tres métodos descritos en función de la combinación sensor + aeronave, de los 15 ensayos realizados en la investigación.

La calificación con que se han valorado los diferentes factores tiene la siguiente notación: 0: nada efectiva; +: poco efectiva; ++: medianamente efectiva; +++: muy efectiva.

Tabla 6.14. Matriz multicriterio que relaciona el método empleado con los factores más relevantes analizados

		MÉTODO EMPLEADO		
		1. CÁMARA MULTIESPECTRAL DE 6 CANALES + MULTIRROTOR	2. CÁMARA FOTOGRÁFICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA + MULTIRROTOR	3. CÁMARA COMPACTA RGB Y CÁMARA MULTIESPECTRAL DE UN SENSOR + ALA FIJA (SKYWALKER KIT)
FACTORES ANALIZADOS	TIPOLOGÍA DE PLANTA	+	++	+
	DETECCIÓN SOBRE WATERBOX	+++	+++	++
	ALTURA DE VUELO	+	++	+++
	TIPOLOGÍA DE SENSOR	+	+++	+
	CONJUNTO AERONAVE + SENSOR	+	++	++
	TRATAMIENTOS DIGITALES	+++	+++	+++
	SOFTWARE EMPLEADO	+++	+++	+++
	EFICIENCIA DEL MÉTODO	0	+++	+++
	TAMAÑO DE LAS PARCELAS	+	+	+++
	EXACTITUD EN EL CÁLCULO DE MARRAS	++	+++	++

A continuación vamos a describir brevemente los resultados alcanzados como paso previo a la presentación de las conclusiones finales.

- La combinación que ha resultado más favorecedora para alcanzar nuestro objetivo ha sido la número 2 (combinación doble cámara + multirrotor) seguida por la número 3 (cámara multiespectral de un sensor + ala fija). La número 1 (Tetracam de 6 canales + multirrotor) es la peor calificada y la única que presenta un valor 0 en uno

de los factores debido a la complejidad y falta de operatividad del método frente a los otros.

- La diferencia entre los dos primeros métodos no es demasiado elevada. La doble cámara vence en 4 factores: tipología de la planta, detección sobre el Waterboxx, tipología del sensor y exactitud en el cálculo de las marras. Sin embargo el ala fija (Skywalker kit) es mejor en altura de vuelo y tamaño de las parcelas (al tener mayor autonomía y velocidad de vuelo, puede monitorizar mayor superficie).
- Estos dos últimos factores tienen una gran importancia y en un futuro próximo, si los sensores tienen mayor resolución espacial con un peso contenido (que es lo más lógico, según la evolución tecnológica que estamos viviendo), la tecnología sensor + ala fija podría ser la más eficiente y la de igual o mayor precisión que la tecnología basada en la doble cámara + multirrotor.



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral hemos realizado un estudio para establecer una metodología que permita discriminar las plantas vivas de las muertas en Waterboxx mediante sensores aeroportados con vehículos aéreos no tripulados e información multiespectral.

Para ello, se ha analizado el estado de la cuestión con respecto a: las plantaciones agroforestales en zonas áridas; el proyecto “LIFE +: “Los Desiertos Verdes”, proyecto en el que se enmarca esta Tesis Doctoral; y las técnicas de muestreo en especies vegetales. Además, se ha indagado en las diferentes plataformas de elevación de sensores y cámaras haciendo especial hincapié en los Vehículos Aéreos No Tripulados, en los diferentes tipos de cámaras multiespectrales, en los tratamientos digitales empleados en el estudio de las plantas y en el uso combinado de los RPAS y sensores para las aplicaciones en el ámbito de la ingeniería, en el estudio de la vegetación y la biomasa y la determinación individual del estado de salud de una planta.

Como consecuencia del análisis, y con respecto a los estudios relacionados con la supervivencia de las plantaciones agroforestales en los primeros estadios de crecimiento en condiciones climáticas áridas, hemos llegado a la conclusión de que el factor más decisivo en la supervivencia inicial de los plántones en estos ambientes es el estrés hídrico.

Dentro del proyecto “LIFE + “Los Desiertos Verdes”, cuyo objetivo es comprobar si el Waterboxx (©Groasis) puede contribuir a aumentar la supervivencia de las plantas en climas extremos y suelos degradados, nos preguntamos si es posible desarrollar una metodología que facilite la monitorización de las plantas en Waterboxx y nos permita discriminar de manera sencilla y exacta las plantas vivas y las muertas. Esta metodología nos permitiría sustituir de manera eficiente el tradicional y costoso sistema de monitorización mediante muestreos sistemáticos a pie de campo.

Con el fin de identificar la metodología más apropiada para la monitorización de las plantas, se ha analizado la vertiginosa evolución de la tecnología referida a las diferentes plataformas de elevación de sensores y cámaras multiespectrales en el ámbito de la ingeniería. Este análisis nos ha permitido comprobar que puede ser factible el empleo de la combinación cámara multiespectral + aeronave para determinar la supervivencia de las plantas en Waterboxx de una manera segura, eficiente y fiable.

En la investigación, se ha realizado un estudio que se ha llevado a cabo en los últimos cinco años y en el que se han realizado 15 vuelos. En esos vuelos se han testado tres métodos diferentes en función de la combinación sensor-aeronave y se han alcanzado las siguientes conclusiones:

1. La combinación cámara multiespectral de 6 canales + multirrotor presenta graves dificultades técnicas. Debido a la escasa resolución espacial de la cámara es necesario volar a muy baja altura (< 22.5 metros). Además, por las características de fabricación de los sensores, junto a problemas surgidos de las vibraciones del multirrotor, por el efecto “*rolling-shutter*” que deforma las imágenes y por la inclinación excesiva de la toma, un porcentaje muy elevado de fotografías se han estimado como no válidas. Si a todas estas circunstancias le añadimos el elevado peso de la cámara que produce una disminución en la autonomía de vuelo, este método se convierte en ineficiente tanto por el excesivo número de imágenes a realizar como por el tiempo empleado en su adquisición. A mayor número de imágenes, el trabajo de gabinete se multiplica y la georreferenciación y mosaicado que lleva el post-proceso hacen que el esfuerzo empleado en el gabinete sea muy elevado, convirtiéndose en una opción compleja y descartable sobre todo en parcelas de grandes dimensiones.
2. La combinación basada en la modificación de una cámara comercial *mirrorless* para capturar el IRc necesita adaptar un gimbal optimizado para el uso de dos cámaras (visible/RGB e IRc) con tecnología de disparo único y sincronizado. El mayor inconveniente de este método es que, para transportar las dos cámaras de tamaño medio, se necesita un multirrotor con una buena capacidad de carga de pago que va a tener una autonomía media-baja de vuelo (a mayor carga de pago, menor autonomía de las baterías). No obstante, las cámaras presentan una buena resolución espacial y pueden elevarse a alturas nominales medias-altas de vuelo (60 m) para obtener una huella de pixel correcta en el terreno, capaz de distinguir plantas de porte medio (45 cm). A mayor altura de vuelo, menor número de imágenes lo que implica un menor tiempo de adquisición y procesamiento. El método empleado conduce de manera semiautomática, por medio del *software* de fotogrametría Agisoft PhotoScan, a la obtención de dos ortofotos georreferenciadas de alta calidad que se solapan perfectamente y que van a admitir los tratamientos digitales necesarios para la correcta identificación de las marras. El proceso es técnicamente viable en parcelas con plantaciones jóvenes y económicamente rentable en parcelas de

tamaño medio (entre 2 y 6 ha). Todos estos factores determinan que esta opción sea la más correcta para alcanzar el objetivo general planteado.

3. El Skywalker Kit (ala fija + cámara multiespectral de un sensor + cámara compacta RGB) permite obtener resultados válidos en la determinación de mareas y plantas vivas. El Skywalker debería volar a la máxima altura permitida (120 metros), pero la resolución del sensor de la cámara multiespectral desaconseja su uso en parcelas con plantas de pequeño porte, por lo que sólo es válido en plantas vigorosas y de elevada altura (> 1 metro). Esto limita la eficiencia del sistema y el potencial de la aeronave, a pesar de tener muy buena autonomía. Por estas razones, y aunque consideramos que el uso de esta combinación va a evolucionar en un futuro inmediato con sensores de mayor resolución espacial y bajo peso, desaconsejamos su uso para la determinación de la supervivencia en los primeros años de la plantación.
4. Una vez desechado el método 1 y tras el análisis realizado de las distintas ventajas e inconvenientes de los otros métodos, se concluye que la aplicación de uno u otro se debería realizar en función del tamaño de planta a evaluar, de su vigor vegetal y de la superficie a muestrear. Para plantas de tamaño medio-bajo o de escaso vigor será conveniente emplear la técnica de la doble cámara + multirrotor, mientras que si las plantas tienen suficiente porte y/o vigor vegetal, podrá utilizarse el Skywalker kit, sobre todo en parcelas suficientemente grandes (> 6 ha). Para el hipotético caso de plantaciones jóvenes con especies de pequeño porte y/o escaso vigor, en parcelas de grandes dimensiones, entendemos que la mejor solución pasaría por instalar un sistema híbrido de doble cámara (RGB/IRc), de peso muy ligero, para que puedan ser incorporadas en el ala fija. En un futuro próximo, de la mano de la nanotecnología, se podrían instalar en el ala fija cámaras multiespectrales ligeras y a un coste económico accesible para estas operaciones.
5. El uso combinado de RPAS y cámaras multiespectrales para la toma de imágenes digitales es una tecnología fiable en la detección de mareas y/o plantas vivas en plantaciones con Waterboxx, pero se debe tener presente que, para obtener unos buenos resultados, es fundamental contar con un presupuesto elevado, habida cuenta de los imprevistos que suelen ocurrir durante los trabajos de campo: viento, accidentes sufridos durante la operación (siniestros por caídas y malos aterrizajes), averías producidas por desgaste y/o roturas de piezas y disponibilidad de horas

útiles de luz (las condiciones de poca luz afectan al canal IRc, por ejemplo, la presencia de pequeñas nubes o calima absorben en gran medida el infrarrojo).

Con respecto a la relación entre tipo de cámara, resolución del sensor, altura de vuelo y tamaño y vigor de la planta, las conclusiones a las que hemos llegado son las siguientes:

1. La cámara Tetracam de 6 canales es cara y obsoleta (aunque todavía se encuentra en algún catálogo y de segunda mano). Genera un método de trabajo tedioso y poco automatizable. La escasa resolución espacial de sus sensores (1.3 Megapíxeles/canal) admite un rango de altura nominal de vuelo para determinación de plantas vivas y de marras demasiado bajo y que varía entre 13.7 y 22.5 metros, dependiendo del porte y vigor vegetal de la especie plantada. En este intervalo de altura de vuelo se obtiene un grado de Exactitud Global (aciertos / plantas analizadas) en la discriminación de plantas vivas y muertas superior al 92%.
2. Debido a la mayor resolución del sensor de la cámara Olympus EP-1 (12 Megapíxeles), se puede elevar la altura nominal de vuelo hasta un rango de 55 – 65 metros con un solape mínimo, longitudinal y transversal del 70% y 40% respectivamente. Para esta altura nominal de vuelo se obtiene una correcta huella de pixel (< 2 cm/pixel). En plantas de porte medio (45 cm) el índice de Exactitud Global es del 99%, aunque existe un pequeño porcentaje de plantas dudosas que es necesario ir a verificar al campo. Este porcentaje de plantas dudosas respecto del total analizado ha sido del 4.3% en nuestros ensayos, lo que supone una altísima reducción del trabajo tradicional de campo.
3. La reducida resolución del sensor de la cámara multiespectral ADC Micro (3.2 Megapíxeles) obliga a realizar vuelos a media/baja altura para poder discernir correctamente las plantas. Aun así, la huella de pixel (> 3cm/pixel) desaconseja su uso en parcelas con especies recién plantadas o de pequeño porte, por lo que su uso sólo es válido en plantas vigorosas y de elevado porte (> 1 metro). En este último caso, el grado de Exactitud Global es superior al 99% y el porcentaje de plantas dudosas frente al total analizado inferior al 1%.

Con respecto al software que nos permita realizar los procesos previos de transformación de las imágenes, la obtención de ortofotos y ortomosaicos y los tratamientos digitales más adecuados, los resultados de nuestro análisis nos llevan a las siguientes conclusiones:

1. La combinación Agisoft PhotoScan para la obtención de MDT de alta precisión de los que se pueden extraer las ortofotos o de PIX4DMapper para obtener los ortomosaicos es perfectamente válida y complementaria.
2. La calidad del ajuste entre las dos ortofotos (visible/RGB e IRc) mejora con el número de puntos de control. Hemos comprobado que 10 o más puntos de control, distribuidos uniformemente por toda la superficie, ofrecen un ajuste óptimo entre ambas.
3. El software PCI Geomática con algoritmos como el ACP y filtros de realce permite fotointerpretar la mayor parte de los plantones en cualquiera de las alternativas sensor + aeronave. Otros índices: NDVI, GNDVI y SAVI obtienen resultados correctos en determinadas especies vegetales.
4. La detección de marras en Waterboxx se dificulta por el hecho de que la respuesta espectral del orificio central interfiere con la de las plantas de pequeño porte e incluso con las muertas, aunque con técnicas de filtraje (tipo Sobel) y aumento del contraste se puede mejorar la detección visual. Sin embargo, en la detección de plantas de porte más elevado, el Waterboxx ayuda porque tras aplicarse el ACP es más fácil distinguir las cajas (de color rojo vivo) de la vegetación más vigorosa (tonos verdes y/o amarillentos).

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1. Los cambios tecnológicos en el sector de la electrónica evolucionan a un ritmo muy elevado. Las cámaras actuales son cada vez más ligeras y de mayor resolución. El modelo Ricoh GR Digital II lleva un sensor CMOS APS-C (de mayor tamaño que los Live MOS 4/3 de Olympus y de 16 Megapíxeles de resolución), puede ser una buena candidata para nuevos ensayos. Es muy ligera (pesa menos de 200 gramos), no lleva filtro de paso bajo y posee un enfoque ultrarrápido muy preciso. Sería muy interesante su modificación para captar el IRc y realizar el montaje de ambas cámaras (RGB e IRc) en un ala fija tipo Skywalker. Con la resolución y calidad de imagen de estos sensores, podríamos elevar la altura nominal de vuelo ya que el tamaño del píxel sobre el terreno a la misma altura será menor. Además, gracias a la autonomía y rapidez de la aeronave se podría monitorizar una superficie mayor alcanzando una mayor eficiencia productiva.

2. También sería factible la incorporación a las monitorizaciones de la Sony A7R II, cámara de formato completo que saldrá al mercado en breve y de la que ya conocemos la espectacular resolución de su sensor CMOS (42.4 Megapíxeles), carece de filtro de paso bajo, tiene estabilización de 5 ejes y un ruido muy comedido (al disponer de un tamaño de pixel grande y un excelente procesador BIONZ X). Su peso sería el factor más limitante por lo que se debería comprobar si se puede montar en un ala fija o, por el contrario, debe ir en un multirroto. Con esta resolución y el sistema de estabilización de 5 ejes que posee podemos augurar fotos nítidas sin ruido a alturas cercanas al tope establecido actualmente en la ley (120 metros).
3. Otra línea de investigación podría consistir en el estudio de la vegetación (por ejemplo en plagas y/o enfermedades) mediante la incorporación de cámaras térmicas en RPAS. Los precios y el tamaño de estas cámaras están disminuyendo gradualmente, a la vez que aumenta la resolución de los sensores.
4. Queremos también destacar que sería muy conveniente la ampliación de este trabajo de investigación al campo de la economía. Proponemos como línea futura de investigación la realización de un estudio económico que compruebe de manera rigurosa la diferencia de costes económicos entre la metodología propuesta y el método tradicional a pie de campo. Se debería tener en cuenta factores diversos como el tiempo empleado en la monitorización, en el tratamiento de las imágenes, la superficie de la parcela, el porte y/o vigor vegetal de las especies y el número y cualificación de los trabajadores necesarios comprobando los costes derivados de cada forma de trabajo estableciendo las conclusiones pertinentes.
5. A partir de un desarrollo informático se podría implementar un algoritmo capaz de posicionar un centroide en cada planta viva de cada Waterboxx, en función de los tratamientos digitales empleados, automatizando la tarea de clasificación.
6. En último lugar pensamos que, aunque esta investigación se refiere a la determinación de plantas vivas y marras únicamente en Waterboxx, se puede aprovechar la metodología contrastada para futuras investigaciones de monitorización en otra clase de individuos vegetales mediante el uso de RPAS e información multiespectral.

Auguramos un despegue tecnológico en este sentido aunque no queda claro si las aplicaciones van a poder ser contratadas por los profesionales del medio agrario o más bien

por empresas, cooperativas o sector público. Para que esto ocurra deben generar riqueza o proporcionar información fiable a los contratantes y eso implica soluciones contrastadas como la que presentamos en esta investigación, pero todos sabemos, que son tantos los factores que inciden en el proceso productivo ligado a las especies vegetales que hacen que esta labor sea técnicamente muy complicada.



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Aber, J. S. (2004). Lighter-than-air platforms for small-format aerial photography. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 107(1), 39-44.
- Aber, J. S., Aber, S. W., & Pavri, F. (2002). Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large-scale, high resolution, multiview-angle imagery.–Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings, 6 S. En *Conference Proceedings*.
- Altan, M. O., Celikoyan, T. M., Kemper, G., & Toz, G. (2004). Balloon photogrammetry for cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5), 964-968.
- Association for Unmanned Vehicle Systems International. (2008). *Unmanned Aircraft System. The Global Perspective 2008/2009*.
- Austin, R. (2011). *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment* (Vol. 54). John Wiley & Sons.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2008). *Fundamentos de Fisiología Vegetal. Capítulo 29: Fisiología de las plantas y el estrés*. Interamericana Mc Graw Hill. Madrid, España.
- Bainbridge, D. A. (2002). Alternative irrigation systems for arid land restoration. *Ecological Restoration*, 20(1), 23–30.
- Barnard, J. (2010). Use of unmanned air vehicles in oil, gas and mineral exploration activities. En *AUVSI Unmanned Syst. North America Conf., Denver, CO, USA*.
- Barrientos, A., del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Universidad politécnica de Madrid, Madrid*.
- Bauman, P. C., Parker, D., Goren, A., Freund, R., & Reeder, P. (2005). Archaeological reconnaissance at Tel Yavne, Israel: 2-D electrical imaging and low altitude aerial

photography. En *18th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*.

Berni, J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(3), 722-738.

Bhardwaj, S., Warbhe, A., & Kumar, B. R. (2015). Sensor System Implementation for Unmanned Aerial Vehicles. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(S2), 7-11.

Bogacki, M., Malkowski, W., & Misiewicz, K. (2008). Kite aerial photography (KAP) as a tool for completing GIS models. Ptolemais (Libya) case study. En *Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop, CNR, Roma* (pp. 329-333).

Boike, J., & Yoshikawa, K. (2003). Mapping of periglacial geomorphology using kite/balloon aerial photography. *Permafrost and periglacial processes*, 14(1), 81-85.

Bortolot, Z. J., & Wynne, R. H. (2005). Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6), 342-360.

Burdett, A. N. (1990). Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(4), 415-427.

Cachorro, V., Berjón, A. J., Guerrero, A., & Cid, J. (2001). Comparación de distintos métodos de clasificación para la discriminación de cultivos de regadío. *Barbecho*, 146, 13.

Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, 38(3), 697-710.

Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España: Rialp.

Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103-5110.

-
- Chuvieco Salinero, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. España: Ariel.
- Comunidad de Madrid. (2015). Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil (p. 240). Madrid: Gráficas Arias Montano. Recuperado a partir de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Los-Drones-y-sus-aplicaciones-a-la-ingenieria-civil-fenercom-2015.pdf>
- Cooperman, A., & Martinez, M. (2015). Load monitoring for active control of wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 189-201.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., & Rodríguez, A. (2012). Predicción de la variabilidad del rendimiento de papa a partir de la cobertura del follaje. *Agriscientia*, 29(1), 15-24.
- Delgado, D. F., Dema, A. V., & Calzada, V. V. (2004). Plantación de *Pinus halepensis* Mill. y *Quercus ilex* subsp. *ballota* (desf.) Samp. en condiciones mediterráneas secas utilizando microcuencas. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (17), 157-161.
- Delgado, M. G., & Cano, J. I. B. (2006). *Sistema de Información Geográfica Y Evaluación Multicriterio en la Ordenación Del Territorio*. Alfaomega Grupo Editor. Recuperado a partir de <https://books.google.es/books?id=-ukZAAAACAAJ>
- Díaz-Varela, R. A., de la Rosa, R., León, L., & Zarco-Tejada, P. J. (2015). High-Resolution Airborne UAV Imagery to Assess Olive Tree Crown Parameters Using 3D Photo Reconstruction: Application in Breeding Trials. *Remote Sensing*, 7(4), 4213-4232.
- Di Castri, F., Goodall, D. W., & Specht, R. L. (1981). Mediterranean-type shrublands. Recuperado a partir de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300323810>
- Dorigo, W. A., Zurita-Milla, R., de Wit, A. J., Brazile, J., Singh, R., & Schaepman, M. E. (2007). A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for

enhanced agroecosystem modeling. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 9(2), 165-193.

Egbert, J., & Beard, R. W. (2011). Low-altitude road following using strap-down cameras on miniature air vehicles. *Mechatronics*, 21(5), 831-843.

Eisenbeiß, H. (2009). *UAV photogrammetry* (Vol. Thesis Diss. ETH No 18515.). ETH Zurich, Switzerland:

English, D. C., Herwitz, S., Hu, C., Carlson Jr, P. R., Muller-Karger, F. E., Yates, K. K., & Ramsewak, D. (2013). Challenges in collecting hyperspectral imagery of coastal waters using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). En *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 1738).

Everaerts, J., Lewyckyj, N., & Fransaer, D. (2004). Pegasus: design of a stratospheric long endurance UAV system for remote sensing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B).

Gago, J., Douthe, C., Coopman, R. E., Gallego, P. P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., ... Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, 9-19.

García-Valdés, R., Svenning, J.-C., Zavala, M. A., Purves, D. W., & Araújo, M. B. (2015). Evaluating the combined effects of climate and land-use change on tree species distributions. *Journal of Applied Ecology*.

Garrido, F., Hernández, S., Clérigo, Z., Marcos, J. L., & Ortiz, L. (2012). Green deserts: novel afforestation technologies in semiarid environments. *OP118. IUFRO Conference. Estoril-Lisboa.*, 111.

Gil, M. L., Ortiz, J., Marcos, J. L., Garrido, F., Martínez, S., Pérez, C., & others. (2013). El control de marras en plantaciones forestales mediante plataformas UAV y sensor multiespectral. En *Actas del 6º Congreso Forestal Español* (pp. 6CFE01-239). Vitoria, Spain: Sociedad Española de Ciencias Forestales. Recuperado a partir de

http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/download/14550/14393

- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2691-2697.
- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S., & Fereres, E. (2013). Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*, 14(6), 660-678.
- González-Jaramillo, V., Buján, S., González-Ferreiro, E., Barreiro-Fernández, L., Diéguez-Aranda, U., & Miranda, D. (2013). Caso de estudio: Planteamiento de una tarifa genérica para estimación de biomasa a partir de datos LiDAR en el municipio de Guitiriz.
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207-1214.
- Grossnickle, S. C. (2000). Ecophysiology of northern spruce species. *The Performance of Planted Seedlings*. NRC Res. Press, Ottawa, ON, Canada. Recuperado a partir de <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/9780660179599>
- Haase, D. L., & Rose, R. (1993). Soil moisture stress induces transplant shock in stored and unstored 2+ 0 Douglas-fir seedlings of varying root volumes. *Forest Science*, 39(2), 275-294.
- Hallermann, N., & Morgenthal, G. (2013). Unmanned aerial vehicles (UAV) for the assessment of existing structures. En *IABSE Symposium Report* (Vol. 101, pp. 1-8). International Association for Bridge and Structural Engineering.

- Hardin, P. J., & Jackson, M. W. (2005). An unmanned aerial vehicle for rangeland photography. *Rangeland Ecology & Management*, 58(4), 439-442.
- Hendrickx, M., Gheyle, W., Bonne, J., Bourgeois, J., De Wulf, A., & Goossens, R. (2011). The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage - An example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay. *Journal of Archaeological Science*, 38(11), 2968-2978. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2011.06.013>
- Herwitz, S. R., Johnson, L. F., Dunagan, S. E., Higgins, R. G., Sullivan, D. V., Zheng, J., ... Aoyagi, M. (2004a). Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1), 49-61.
- Herwitz, S. R., Johnson, L. F., Dunagan, S. E., Higgins, R. G., Sullivan, D. V., Zheng, J., ... Aoyagi, M. (2004b). Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1), 49-61.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Hunt Jr, E. R., Cavigelli, M., Daughtry, C. S., McMurtrey III, J. E., & Walthall, C. L. (2005). Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 6(4), 359-378.
- Inoue, Y., Morinaga, S., & Tomita, A. (2000). A blimp-based remote sensing system for low-altitude monitoring of plant variables: a preliminary experiment for agricultural and ecological applications. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 379-385.
- International Civil Aviation Organization. (2011). *Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*. Quebec, Canada. Recuperado a partir de http://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_es.pdf
- Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., & Lin, Y. (2010). A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree

- measurements. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6), 514-522.
- Johnson, G., Meisner, D., & Johnson, W. (1990). Aerial photography of the Nazca lines. *Aveni (ed.)*, 271-283.
- Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., van Aardt, J., & Coppin, P. (2006). A fractal dimension-based modelling approach for studying the effect of leaf distribution on LAI retrieval in forest canopies. *ecological modelling*, 197(1), 179-195.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 663-666.
- Kaaniche, K., Champion, B., Pégard, C., & Vasseur, P. (2005). A vision algorithm for dynamic detection of moving vehicles with a UAV. En *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 1878-1883). IEEE.
- Kaimaris, D., & Patias, P. (2014). A Low-Cost Image Acquisition System for the Systematic Observation of Traces of Buried Archaeological Structures. *GEOMATICA*, 68(4), 299-308.
- Kemper, G., Celikoyan, T. M., Altan, M. O., & Toz, G. (2003). Balloon-photogrammetry for cultural heritage. En *4th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas* (pp. 27-29).
- Kerle, N., Heuel, S., & Pfeifer, N. (2008). Real-time data collection and information generation using airborne sensors. *Geospatial information technology for emergency response*, 43-74.
- Kise, M., Zhang, Q., & Más, F. R. (2005). A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosystems Engineering*, 90(4), 357-367.
- Klemas, V. V. (2015). Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Journal of Coastal Research*.

- Kurz, F. (2003). *Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten*. Technische Universität München.
- Laliberte, A. S., & Rango, A. (2009). Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(3), 761-770.
- Laliberte, A. S., Rango, A., & Herrick, J. E. (2007). Unmanned aerial vehicles for rangeland mapping and monitoring: a comparison of two systems. En *ASPRS Annual Conference Proceedings*.
- Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., & Hanusch, T. (2007). Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1702-1712.
- Lechner, A. M., Fletcher, A., Johansen, K., & Erskine, P. (2012). Characterising Upland Swamps Using Object-based Classification Methods and Hyper-spatial Resolution Imagery Derived from an Unmanned Aerial Vehicle. En *Proceedings of XXII ISPRS Congress* (pp. 101-106). ISPRS Melbourne.
- Lee, K. H., Ehsani, R., & Schueller, J. K. (2007). Forward movement synchronization of two vehicles in parallel using a laser scanner. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(6), 827-836.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies Lidar. *BioScience*, 52(1), 19-30.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., & Spies, T. A. (2001). An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(1), 78-87.
- Lehmann, J. R. K., Nieberding, F., Prinz, T., & Knoth, C. (2015). Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry—A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. *Forests*, 6(3), 594-612.

-
- Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., & Allemand, P. (2007). Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11), 1705-1725.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., & Guyon, D. (1992). Relating forest biomass to SAR data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30(2), 403-411.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lim, K. S., & Treitz, P. M. (2004). Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 558-570.
- Lin, Y., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, L., & Lin, J. (2015). Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 404-412.
- Li, Z., Liu, Y., Hayward, R., Zhang, J., & Cai, J. (2008). Knowledge-based power line detection for UAV surveillance and inspection systems. En *Image and Vision Computing New Zealand, 2008. IVCNZ 2008. 23rd International Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A. I., Mesas-Carrascosa, F.-J., & Peña, J.-M. (2015). Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds. *Precision Agriculture*, 1-17.
- Maestre, F. T., Cortina, J., Bautista, S., & Bellot, J. (2003). Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of shrubs in Mediterranean semi-arid afforestations? *Forest Ecology and Management*, 176(1), 147–160.
- Mano, J. (2002). Early events in environmental stresses in plants. Induction mechanisms of oxidative stress. *Oxidative stress in plants*, 217-245.

- Marcos, J. L., Ortiz, L., Garrido, F., Clérigo, Z., Hernández, S., Gil, M. L., ... others. (2013). Efecto termoaislante del waterboxx en las repoblaciones forestales. En *Actas del 6º Congreso Forestal Español* (pp. 6CFE01-137). Vitoria, Spain: Sociedad Española de Ciencias Forestales. Recuperado a partir de <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/download/10654/10558>
- Martínez de Azagra, A., & Del Río, J. (2012). *Los riegos de apoyo y de socorro en repoblaciones forestales* (Vol. 54). Foresta.
- Martínez de Azagra, A., & Mongil, J. (2001). Algunos criterios para el diseño de sistemas de recolección de agua en repoblaciones forestales. En *Congresos Forestales*.
- Martínez, S., Ortiz, J., & Gil, M. L. (2015). Geometric documentation of historical pavements using automated digital photogrammetry and high-density reconstruction algorithms. *Journal of Archaeological Science*, 53, 1-11. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2014.10.003>
- Matorel, M. (1998). Riego en el desierto. Reservorios de exudación subterránea. *Revista Agronoticias*, 223, 34.
- Meeuwig, R. O., & Miller, E. L. (1979). *Estimating pinyon and juniper fuel and biomass from aerial photographs* (Vol. 274). USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Michez, A., Lisein, J., Toromanoff, F., Bonnet, S., Lejeune, P., & Claessens, H. (2013). Classification of riparian forest species (individual tree level) using UAV-based Canopy Height Model and multi-temporal orthophotos (Vielsalm, Eastern Belgium). En *Workshop on UAV-based Remote Sensing Methods for Monitoring Vegetation*.
- Microbes, B. (2015a). NDVI-based vigour maps production using automatic detection of vine rows in ultra-high resolution aerial images. *Precision agriculture*, 15(1), 1.
- Microbes, B. (2015b). Vegetation indices from unmanned aerial vehicles-mounted sensors to monitor the development of maize (*Zea mays* L.) under different N rates. *Precision agriculture*, 15(1), 1.

-
- Montalvo Rodríguez, J., Fernández Ulloa, A., Durán Amores, A., Lanaja del Busto, J., Sánchez Jardón, L., Acosta Gallo, B., ... Herrero de Jáuregui, C. (2013). Inventario exhaustivo de carbono en pinares de Coca (Segovia) mediante datos LiDAR. En *Congresos Forestales*.
- Moorthy, I., Miller, J. R., Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P., Hu, B., & Chen, J. (2011). Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(2), 204-214.
- Moreno, J. M., De la Rosa, D., & Zazo, C. (2005). Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático.
- Morsdorf, F., Kötz, B., Meier, E., Itten, K. I., & Allgöwer, B. (2006). Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104(1), 50-61.
- Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K. I., Dobbertin, M., & Allgöwer, B. (2004). LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 353-362.
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR).
- Naesset, E. (1997). Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61(2), 246-253.
- Nebiker, S., Annen, A., Scherrer, M., & Oesch, D. (2008). A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 37, 1193-1200.
- Nebiker, S., Christen, M., Eugster, H., Flückiger, K., & Stierli, C. (2007). Integrating mobile geo sensors into collaborative virtual globes—design and implementation issues. En *Mobile Mapping Technologies Symposium MMT*.

- Neumann, R. W., & Landis, T. D. (1995). Benefits and techniques for evaluating outplanting success. *National proceedings: forest and conservation nursery associations—1995. Coordinated by Landis, TD, and Cregg, B. USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR-365*, 36-43.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
- Nonami, K. (2007). Prospect and recent research & development for civil use autonomous unmanned aircraft as UAV and MAV. *Journal of system Design and Dynamics*, 1(2), 120-128.
- Olivar, J., Bogino, S., Spiecker, H., & Bravo, F. (2015). Changes in climate-growth relationships and IADF formation over time of pine species (*Pinus halepensis*, *P. pinaster* and *P. sylvestris*) in Mediterranean environments. *Forest Systems*, 24(1), 010.
- Ortiz, J., Gil, M. L., Martínez, S., Rego, M. T., & Mejjide, G. (2010). A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3158-3169. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2010.07.017>
- Ortiz, J., Gil, M. L., Martinez, S., Rego, T., & Mejjide, G. (2013). Three-dimensional Modelling of Archaeological Sites Using Close-range Automatic Correlation Photogrammetry and Low-altitude Imagery. *Archaeological Prospection*, 20(3), 205-217. <http://doi.org/10.1002/arp.1457>
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. JHU Press.
- Pensado, I. (2011). *Determinación de la altura de planta y marras mediante fotogrametría y teledetección de baja altitud. Prueba piloto para el proyecto Green Deserts*. Universidad de Santiago de Compostela. Sin publicar.

-
- Peña-Barragán, J. M., López-Granados, F., García-Torres, L., Jurado-Expósito, M., De La Orden, M. S., & García-Ferrer, A. (2008). Discriminating cropping systems and agro-environmental measures by remote sensing. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(2), 355-362.
- Pérez Abellán, M. Á. (2015). Un estudio del cambio climático en sectores de interés socioeconómico y sus efectos en España y la Región de Murcia.
- Pinter Jr, P. J., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S., & Upchurch, D. R. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 647-664.
- Pitt, D. G., Glover, G. R., & Jones, R. H. (1996). Two-phase sampling of woody and herbaceous plant communities using large-scale aerial photographs. *Canadian journal of forest research*, 26(4), 509-524.
- Potosme, N. M. R. (2008). *Determinación de la distribución potencial del pinus halepensis Mill en Castilla y León mediante técnicas geoestadística.*
- Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(4), 517-523.
- Püschel, H., Sauerbier, M., & Eisenbeiss, H. (2008). A 3D model of Castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 37, 93-98.
- Quilter, M. C., & Anderson, V. J. (2001). A proposed method for determining shrub utilization using (LA/LS) imagery. *Journal of Range Management*, 378-381.
- Rao, Y. S., Deo, R., Nalini, J., Pillai, A. M., Muralikrishnan, S., & Dadhwal, V. K. (2014). Quality assessment of TanDEM-X DEMs using airborne LiDAR, photogrammetry and ICESat elevation data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 187-192.

- Raumonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., ... Lewis, P. (2013). Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing*, 5(2), 491-520.
- Reidelstuerz, P., Link, J., Graeff, S., & Claupein, W. (2007). UAV (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13. En *Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming* (Vol. 61, pp. 75-84).
- Richards, J. A. (1984). Thematic mapping from multitemporal image data using the principal components transformation. *Remote Sensing of Environment*, 16(1), 35-46.
- Ries, J. B., & Marzloff, I. (2003). Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp. *Catena*, 50(2), 309-328.
- Rodríguez-Estévez, V., Martínez, A. G., Moreno, C. M., Muñoz, J. P., & Castro, A. G. (2008). Fundamento de los procedimientos para la estimación de la producción de bellota en la dehesa. *Arch. Zootec*, 57, 29-38.
- Rodríguez Pérez, J. R., Miranda, D., & Álvarez, C. J. (2013). Application of satellite images to locate and inventory vineyards in the designation of origin« Bierzo» in Spain.
- Rovira-Más, F., Zhang, Q., & Reid, J. F. (2008). Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(2), 133-143.
- Ruzgienė, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskienė, E., & Aksamitauskas, V. Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, 73, 619-627. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018>
- Sánchez, J. S., Oller, R. O., Muñoz, M. H., Ruiz, F. P., & de Idaola, F. P. (2004). El microrriego, una técnica de restauración de la cubierta vegetal para ambientes semiáridos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (17).
- Santos, W. J. R., Silva, B. M., Oliveira, G. C., Volpato, M. M. L., Lima, J. M., Curi, N., & Marques, J. J. (2014). Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor

- assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma*, 221–222, 91-95.
<http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.006>
- Sauerbier, M., & Eisenbeiss, H. (2010). UAVS FOR THE DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS. *Proceedings of the Isprs Commission V Mid-Term Symposium Close Range Image Measurement Techniques*, 38, 526-531.
- Sebem, E., González, C., García, R., de la Vega, R., & Valverde, A. (2005). Aportación del NDVI y los sistemas expertos en la mejora de la clasificación temática de imágenes multiespectrales. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil*, 16-21.
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335-1372.
- Sharma, A., Dilawari, G., Osborne, S., Banks, J. C., Taylor, R., & Weckler, P. (2008). On-the-go sensor system for cotton management. En *Proceedings of the Beltwide Cotton Conference* (pp. 588-593).
- Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41, 1-14.
<http://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>
- Silva, A. de S., da Silva, D., Gheyi, H. R., & Porto, E. R. (1984). Viability of irrigation by porous capsule method in arid and semi-arid regions.. Recuperado a partir de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=ACERVO.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=063325>
- Skaloud, J., Vallet, J., Keller, K., Veyssiere, G., & Kölbl, O. (2001). HELIMAP: Rapid large scale mapping using handheld LiDAR/CCD/GPS/INS sensors on helicopters. En

Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005) (pp. 2461-2467).

Slaughter, A., Laliberte, A., Rango, A., Maxwell, C. J., & Winters, C. D. (2008). Rangeland monitoring with unmanned aerial vehicles (UAVs). En *The 2008 Joint Meeting of the Society for Range Management and the America Forage and Grassland Council*.

Smith, M. J., Chandler, J., & Rose, J. (2009). High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(1), 155-161.

Sobrino, J. A. (2000). Teledetección. *Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia*.

Solberg, S., Brunner, A., Hanssen, K. H., Lange, H., Næsset, E., Rautiainen, M., & Stenberg, P. (2009). Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of environment*, 113(11), 2317-2327.

Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Berni, J. A. J., Sagardoy, R., Morales, F., & Fereres, E. (2010). Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 286-298.

Sugiura, R., Noguchi, N., & Ishii, K. (2005). Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems engineering*, 90(4), 369-379.

Sugiura, R., Noguchi, N., & Ishii, K. (2007). Correction of low-altitude thermal images applied to estimating soil water status. *Biosystems engineering*, 96(3), 301-313.

Sun, Z., Wang, P., Vuran, M. C., Al-Rodhaan, M. A., Al-Dhelaan, A. M., & Akyildiz, I. F. (2011). BorderSense: Border patrol through advanced wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 9(3), 468-477.

Tambussi, E. A. (2005). *Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estrés abiótico: algunos casos de estudio*. Universitat de Barcelona.

-
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., & Peña, J. M. (2015). An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 43-52.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Valero Ubierna, C., Navas Gracia, L. M., González Herrero, F., Gómez Gil, J., Ruiz Ruiz, G., Barreiro Elorza, P., ... Garrido Izaola, M. (2010). Ahorro y eficiencia energética en la Agricultura de Precisión.
- Vallet, J. (2007). GPS/IMU and LiDAR integration to aerial photogrammetry: Development and practical experiences with Helimap System. *Vorträge Dreiländertagung*, 27.
- Vallet, J., & Skaloud, J. (2004). Development and experiences with a fully-digital handheld mapping system operated from a helicopter. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul*, 35(Part B).
- Valpreda, C. (2007). Sistema de Información Geográfica (SIG)-teledetección y evaluación multicriterio (EMC) en un estudio de evaluación de impacto ambiental (EIA). En *Memorias XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica* (pp. 29-31).
- Varela, V. (2014). *Determinación de marras en la plantación de San Mateo de Gállego (Zaragoza) mediante teledetección de baja altitud*. Universidad de Santiago de Compostela. Sin publicar.
- Verhoeven, G. (2008). Imaging the invisible using modified digital still cameras for straightforward and low-cost archaeological near-infrared photography. *Journal of Archaeological Science*, 35(12), 3087-3100.
- Verhoeven, G. (2009). Providing an archaeological bird's-eye view—an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. *Archaeological Prospection*, 16(4), 233-249.

- Verhoeven, G. J. J., Loenders, J., Vermeulen, F., & Docter, R. (2009). Helikite Aerial Photography - a Versatile Means of Unmanned, Radio Controlled, Low-Altitude Aerial Archaeology. *Archaeological Prospection*, 16(2), 125-138. <http://doi.org/10.1002/arp.353>
- Vogler, A., Eisenbeiss, H., Aulinger-Leipner, I., & Stamp, P. (2009). Impact of topography on cross-pollination in maize (*Zea mays* L.). *European journal of agronomy*, 31(2), 99-102.
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671-1692.
- Wendel, J., Meister, O., Schlaile, C., & Trommer, G. F. (2006). An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter. *Aerospace Science and Technology*, 10(6), 527-533.
- Wolf, E. B. (2006). Low-Cost Large-Scale Aerial Photography and the Upland South Folk Cemetery. *Northwest Missouri State University: Maryville*.
- Wu, S. (1987). Potential application of multipolarization SAR for pine-plantation biomass estimation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, (3), 403-409.
- Xiang, H., & Tian, L. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*, 108(2), 174–190.
- Zahawi, R. A., Dandois, J. P., Holl, K. D., Nadwodny, D., Reid, J. L., & Ellis, E. C. (2015). Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*, 186, 287-295.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.
- Zhou, G., Li, C., & Cheng, P. (2005). Unmanned aerial vehicle (UAV) real-time video registration for forest fire monitoring. En *Geoscience and Remote Sensing*

Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International (Vol. 3, pp. 1803-1806). IEEE.



ANEJOS

ANEJOS

ANEJO 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Tabla 1. Ficha técnica del Microdrone MD4-1000

Peso sin carga	2.8 Kg
Peso máximo de carga útil	1.2 Kg
Dimensiones	109 cm entre ejes
Autonomía de vuelo	Hasta 60 min en vacío
Radio de operación	700 m
Batería (6s)	3x 6S(6 Celdas) ó 6S2P(12 Celdas) ó 6S3P(18 Celdas), 22.2v, 12.2 Ah
Humedad	<90%
Temperatura ambiental de operación	0-40 °C (limitado por la batería de las cámaras).
Altura máxima permitida	<150 m.
Altura de inicio sobre el nivel del mar	hasta 2500 m
Velocidad de vuelo	12 m/s (42 Km/h)
Modos de vuelo	radio control, GPS, Waypoints
Vuelos con vientos máximos de	10-13 m/s (36-47 Km/h)
Motores	4
Software de control	MdCockpit-Waypoint Editor

Tabla 2. Ficha técnica del Mikrokopter UfocamXXI8 V3

Peso sin carga	2.5 Kg.
Peso máximo de carga útil	2.5 Kg.
Dimensiones	Ancho: 84cm. Largo: 84 cm. Altura: 25 cm.
Autonomía de vuelo	Hasta 30 min en vacío.
Batería (4s)	5200 mAh Batería de Polímero de litio 14.8v 35c.
	6600 mAh Batería de Polímero de Litio 14.8v 35c
Humedad	<90%
Temperatura ambiental de operación	-20°C +75 °C (limitado por la batería de las cámaras).
Alcance	250 m ampliable a 500 m.
Altitud máxima de vuelo	500m respecto al punto de despegue, limitada electrónicamente a 120m de altura desde el punto de despegue
Velocidad de vuelo	Hasta 50 Km/h
Modos de vuelo	radio control, GPS, Waypoints
Vuelos con vientos máximos de	Hasta 40 Km/h
Motores	8 Mk3638 con 8 hélices (4 Apc 12x3.8Sf y 4 Apc 12x3.8Sp a 770 rpm
Emisora	Graupner MX-20/MC-32 con receptor GR-16
Software de control	WooKong-M (Octo XL) y MK-Tool (UFOCAMXL8)

Tabla 3. Especificaciones del ala fija Skywalker

Peso sin carga	1.3 Kg
Peso máximo de carga útil	3.0 Kg
Envergadura de alas	1880 mm
Autonomía de vuelo	Hasta 40 min a plena carga. 1 hora con batería <i>long endurance</i>
Batería (4s)	5000 mAh. Batería de polímero de litio
	10000 mAh. Batería de polímero de Litio
Air Brakes	Para aterrizajes cortos
Modos de vuelo	Radio control, GPS, <i>waypoints</i>
Velocidad de vuelo	Hasta 55 Km / h
Modos de vuelo	radio control, GPS, Waypoints
Vuelos con vientos máximos de	Hasta 40 Km / h
Motores	1
Emisora	Futaba con PCM 1024 y puerto manual
Software de control	U-see

Tabla 4. Características técnicas de la Canon EOS 400D

Total de Megapíxeles	10.1 (10 efectivos)
Resolución del sensor	3888 x 2592 píxeles
Tipo y tamaño del sensor (mm)	CMOS de 22.2 x 14.8
Tamaño de píxel (µm)	5.71 x 5.71
Focal y equivalente en 35mm (mm)	20 / 32.43
Tipo	CompactFlash tipo I / II (compatible con Microdrive)
Tipo de imagen fija	JPEG, RAW, (12 bits, Canon RAW original, 2ª edición)
Tamaño de imagen	JPEG: (L) 3888 x 2592, (M) 2816 x 1880, (S) 1936 x 1288 RAW: (RAW) 3888 x 2592

Tabla 5. Especificaciones del objetivo Canon 20mm f/2,8 USM

Ángulo de visión (horizontal, vertical, diagonal)	84°, 62°, 94°
Construcción del objetivo (elementos/grupos)	11/9
Nº de hojas del diafragma	5
Abertura mínima	22
Distancia mínima de enfoque (m)	0.25
Aumento máximo (x)	0.14
Motor para el AF	USM ¹
Diámetro del filtro (mm)	72
Peso (gr)	405

Tabla 6. Ficha técnica Olympus PEN E-P1

Tipo de Producto	Cámara Digital Live View con Objetivos Intercambiables
Memoria	Tarjeta de Memoria SD (compatible con SDHC) Se recomienda Clase 6 para grabación de Película
Tamaño del sensor	Ratio: 4:3 / 17.3 x 13.0 mm
Montura del Objetivo	Montaje tipo Micro Cuatro Tercios
Número de Píxeles efectivos	12.3 millones de píxeles
Tipo de Producto	Sensor Live MOS de alta velocidad
Número total de píxeles	Aprox. 13.1 millones de píxeles
Proporción de Aspecto	1.33 (4:3)
Variedad de Filtros	Filtro de color primario (RGB)
LPF	Tipo fijo
Filtro IR	Tipo híbrido
Reducción de polvo	Supersonic Wave Filter (sistema de reducción de polvo para el sensor de imagen)
Formato de grabación	DCF, DPOF compatible/Exif, PRINT Image Matching III
Formato de archivo	RAW (12-bit), JPEG, RAW+JPEG
Tamaño de la imagen	4032 x 3024 Comprimido / 14 MB / fotograma
Peso	Peso 383 g (batería y tarjeta de memoria incluidas)

Tabla 7. Ficha técnica del objetivo M. Zuiko Digital ED 12mm f2

Distancia focal	12 mm
Ángulo de visión	84 grados
Apertura	Máxima (W-T) f2 Mínima f22
Aspas del diafragma	7
Estabilizador	no
Distancia mínima	20 cm
Macro	no
Factor de ampliación	1 : 12.5
Diámetro	56 mm
Longitud	43 mm
Peso	130 g

Tabla 8. Especificaciones de la cámara Canon A-810

Memoria	SD Card, SDHC, SDXC
Tamaño de la cámara (mm)	94.7 x 61.3 x 29.8
Enfoque	Automático
Número de Píxeles efectivos	16 millones de píxeles
Tipo de Sensor y tamaño	Sensor CCD 1 / 2.3
Proporción de Aspecto	1.33 (4:3)
Velocidad máx	1/2000
Formato de archivo	JPEG, RAW en CHDK
Tamaño de la imagen	Máx 4608 x 3456
Peso	Peso 171 g

Tabla 9. Características de los canales de la cámara multiespectral Tetracam Mini MCA-6

Canal	Longitud de onda (λ)	Región del espectro
Master	531.91 nm	Verde
Slave1	551.08 nm	Verde
Slave2	570.53 nm	Verde
Slave3	672.85 nm	Rojo
Slave4	701.73 nm	Rojo
Slave5	802.48 nm	Infrarrojo cercano

Tabla 10. Ficha técnica de la cámara multiespectral Tetracam Mini MCA-6

Sensor	CMOS (1 por canal)
Megapíxeles	1.3
Rango	532nm a 802 nm
Canales	6
Resolución (píxeles)	1280 x 1024
Filtros de espectrómetro (mm)	25 estándar
Tarjeta de memoria	Estándar de <i>Compact Flash Memory</i>
Formato de imagen	<i>Compact Flash</i> en Tetracam DCM, de 8 y 10 bits. Formato RAW.
Captura Singel Shot	3-5 seg, archivos de RAW 1 seg
Interfaz de datos	USB 1.1
Conector para uso con el disparador remoto	Multi-pin I/O
Capacidad de captura	512 MB CF card (1 por canal)
Input	12 VDC 1.A RS-232
Salidas	NTCS o PAL video en tiempo real
Dimensiones	115 mm x 78 mm x 88 mm con lentes
Peso	630 – 780 g

Tabla 11. Especificaciones de la cámara multiespectral Tetracam ADC Micro

Sensor	CMOS (6.59 x 4.9mm). Sensor único.
Megapíxeles	3.2 megapíxeles
Rango	520 a 920 nm
Distancia focal de lente	8.43 mm f 3.2
Resolución (píxeles)	2048 x 1536
Tarjeta de memoria	<i>MicroSD</i> de hasta 16Gb de capacidad
Formato de imagen	RAW 8 y 10 bits. DCM 10 bits.
Captura Singel Shot	DCM (10) 7 seg, RAW (10) 4 seg, RAW (8) 3 seg
Interfaz de datos	USB 2.0
Conector disparador remoto	Multi-pin I/O
Capacidad de captura	Hasta aproximadamente 3 Mb por imagen
Input	6-12 VDC 160 mA. RS-232
Salidas	NTCS o PAL video en tiempo real. LCD
Dimensiones	75 mm x 59 mm x 33 mm con lente
Peso	90 g

Tabla 12. Especificaciones del modelo SR530 del sistema Leica GPS SYSTEM 500

Tecnología del receptor	ClearTrak – patentada. Excelente seguimiento
Número de canales	12 L1 + 12 L2
L1 mediciones	Fase portadora longitud de onda completa. Código C/A. Código de precisión
L2 mediciones	Fase portadora longitud de onda completa con AS desactivado o código P2 Rendimiento igual con AS activado o desactivado
Mediciones independientes	Mediciones totalmente independientes L1 y L2, código y fase.
Tiempo para la primera medida de fase después del encendido	30 segundos típicamente
Indicadores status LED	3 para energía, modo seguimiento, modo grabación
Puertos	3 RS232/ puertos con energía 1 RS232 puerto, 1 puerto de energía, 1 puerto TCN antena. 1 PPS, 2 puertos eventuales
Voltaje	Nominal 12V DC
Consumo eléctrico	7W, receiver with terminal
Dimensiones	205mm x 165mm x 72mm
Peso del receptor	1.25 kg
Modos de medición	<ul style="list-style-type: none"> • Cinemático en tiempo real • Post-proceso • Estático, estático rápido • Parar y seguir, cinemático • Cinemático OTF • DGPS y Navegación • Cinemático en tiempo real • Post-proceso • Estático, estático rápido • Parar y seguir, cinemático • Cinemático OTF • DGPS y Navegación

ANEJO 2. AREA DE ESTUDIO

2.1. VILLARRAMIEL (PALENCIA)

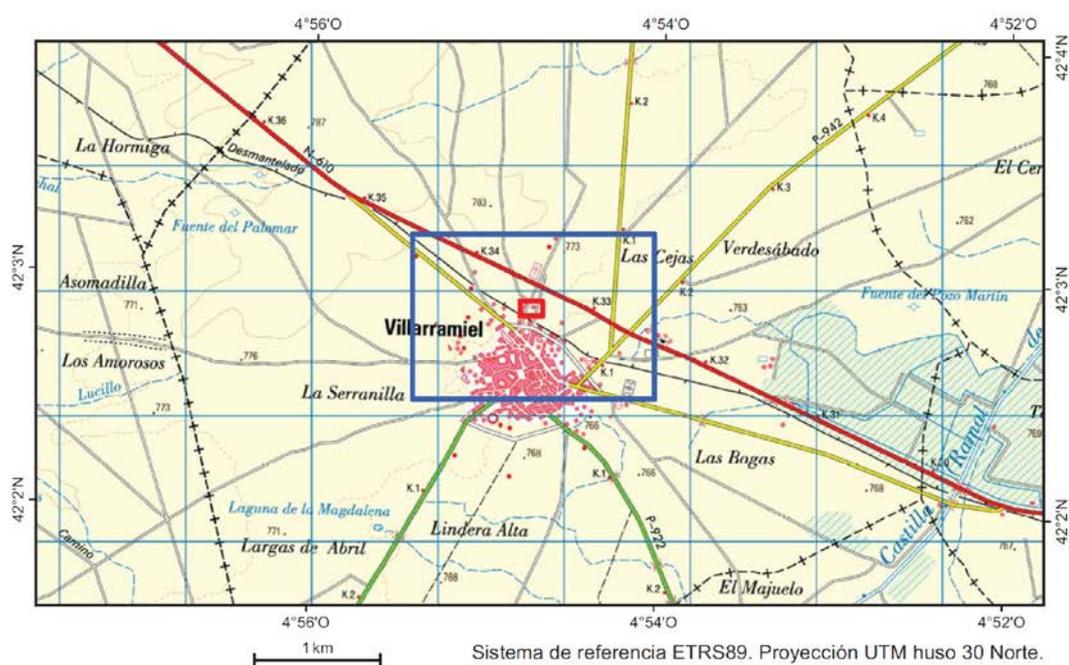


Ilustración 1. Situación de parcela de Villarramiel. Escalas varias



Ilustración 2. Parcela de Villarramiel (en verde) antes de la plantación

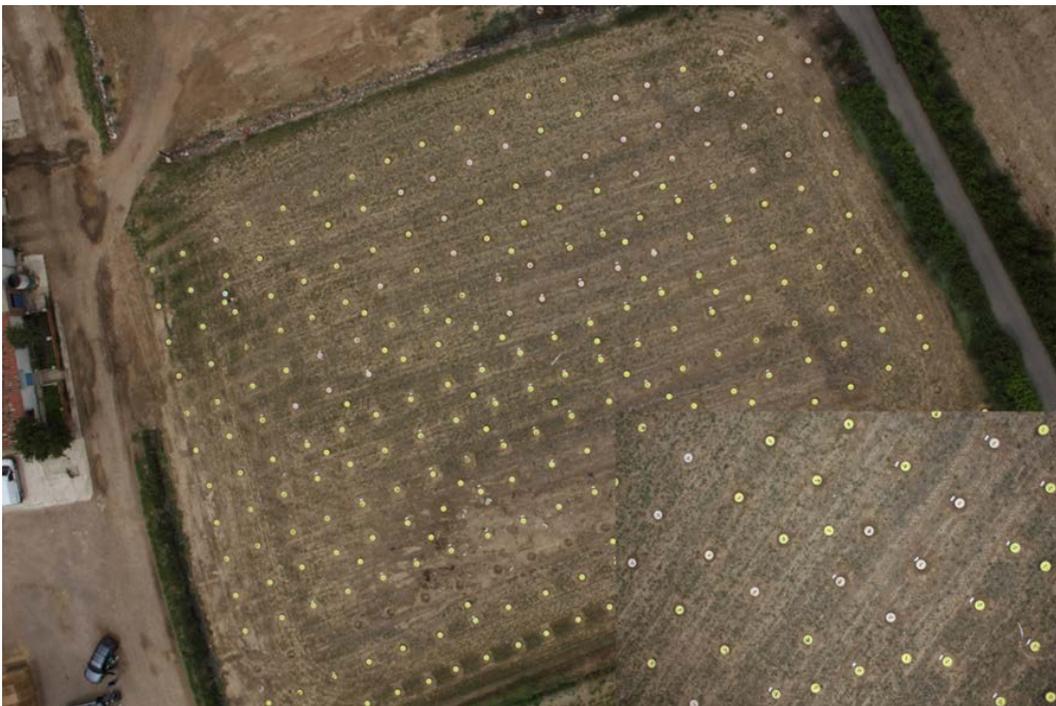


Ilustración 3. Vista aérea de la parcela de Villarramiel con un detalle de la disposición de los Waterboxx

2.2. SAN MATEO DE GÁLLEGO (ZARAGOZA)

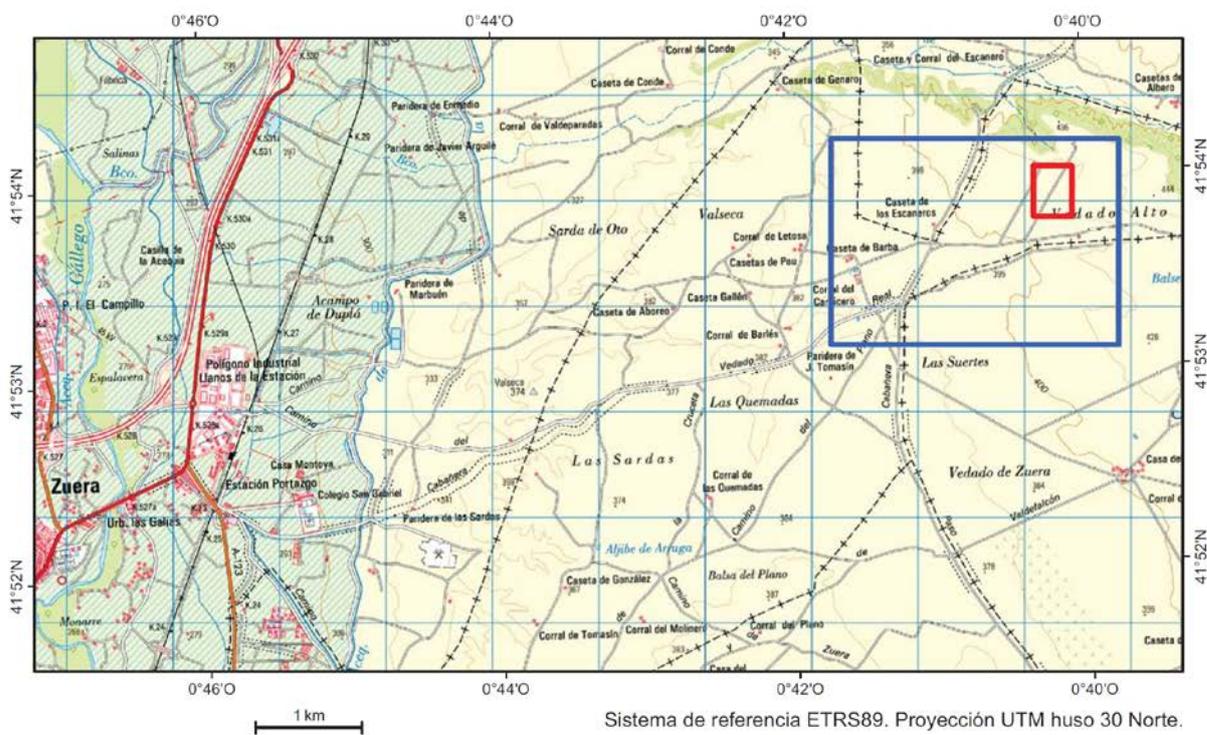
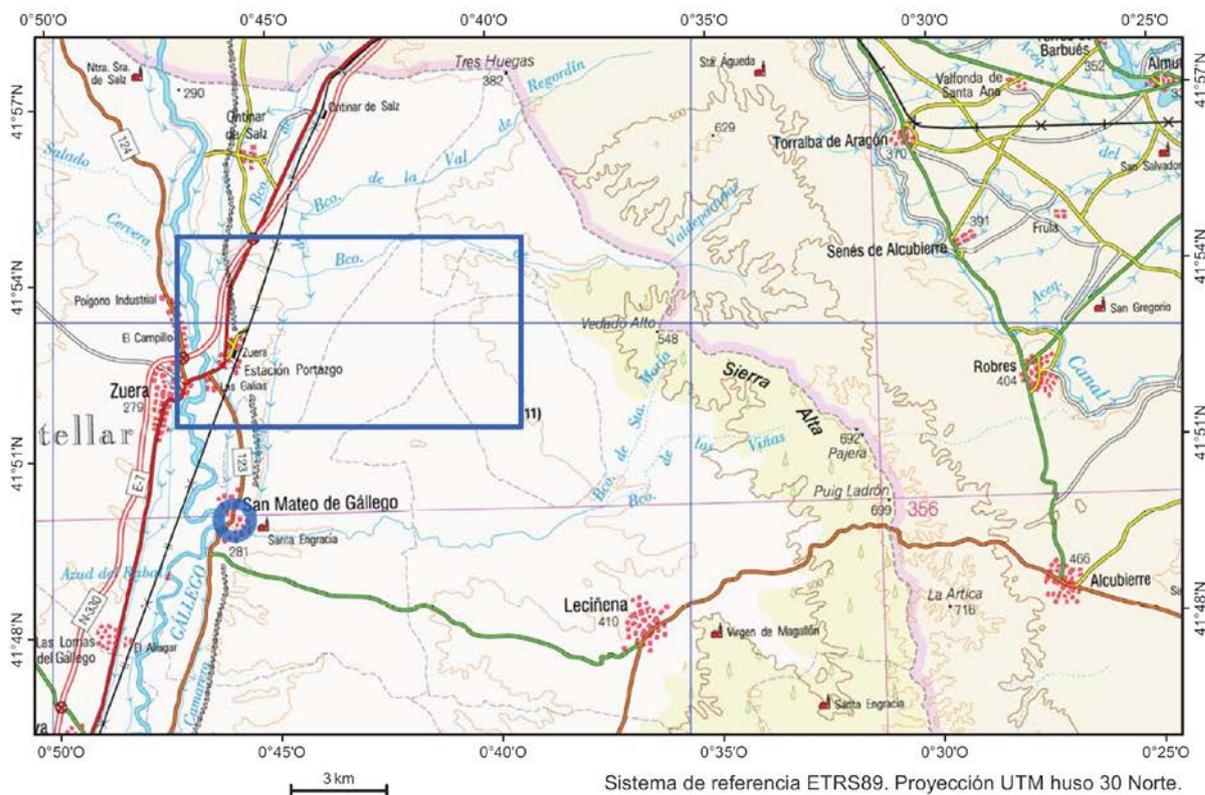


Ilustración 4. Situación de la parcela de San Mateo de Gállego. Escalas Varias



Ilustración 5. Localización de la parcela de San Mateo de Gállego



Ilustración 6. Vista aérea de una parte de las parcela B y C de San Mateo de Gállego con la disposición de los Waterboxx. Año 2012



Ilustración 7. Parcelas de San Mateo de Gállego antes de la plantación. Las parcelas monitorizadas están rotuladas como B (se voló en el año 2012) y C (en el año 2015). En amarillo puntos de control sobre el terreno del Proyecto LIFE+: “Los Desiertos Verdes”

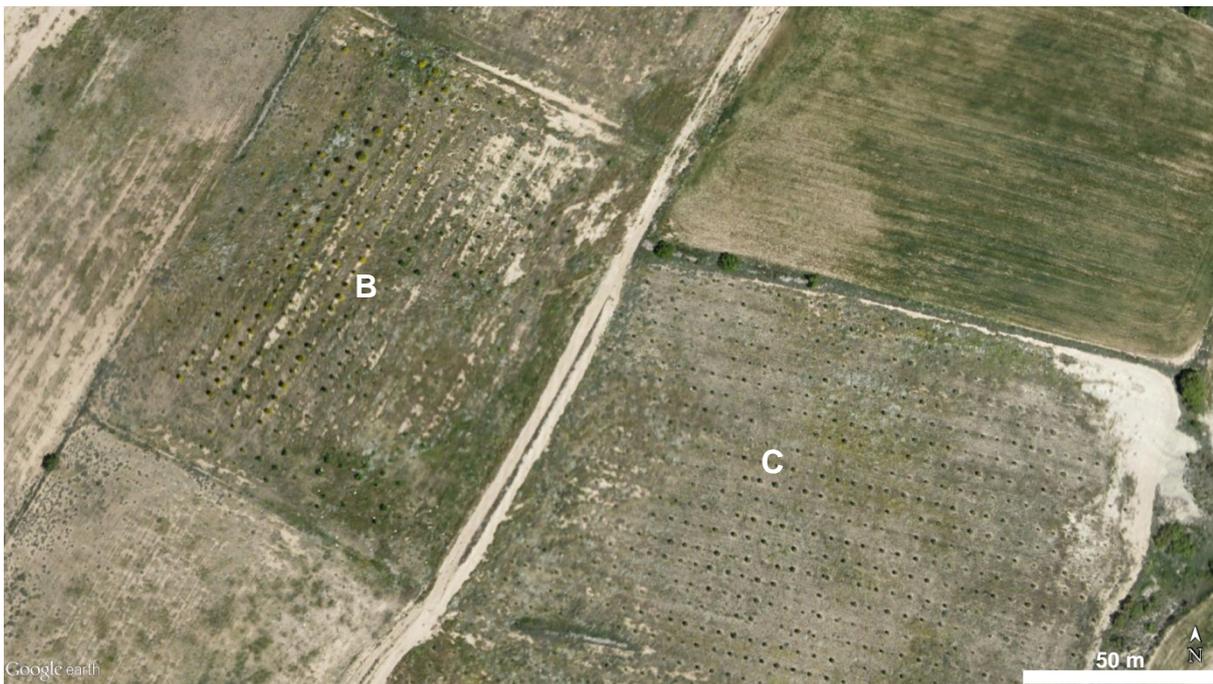


Ilustración 8. Detalle de ortofoto del vuelo de las parcelas de San Mateo de Gállego insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Parcelas parcialmente monitorizadas B y C. Año 2015

2.3. SOTO DE CERRATO (PALENCIA)

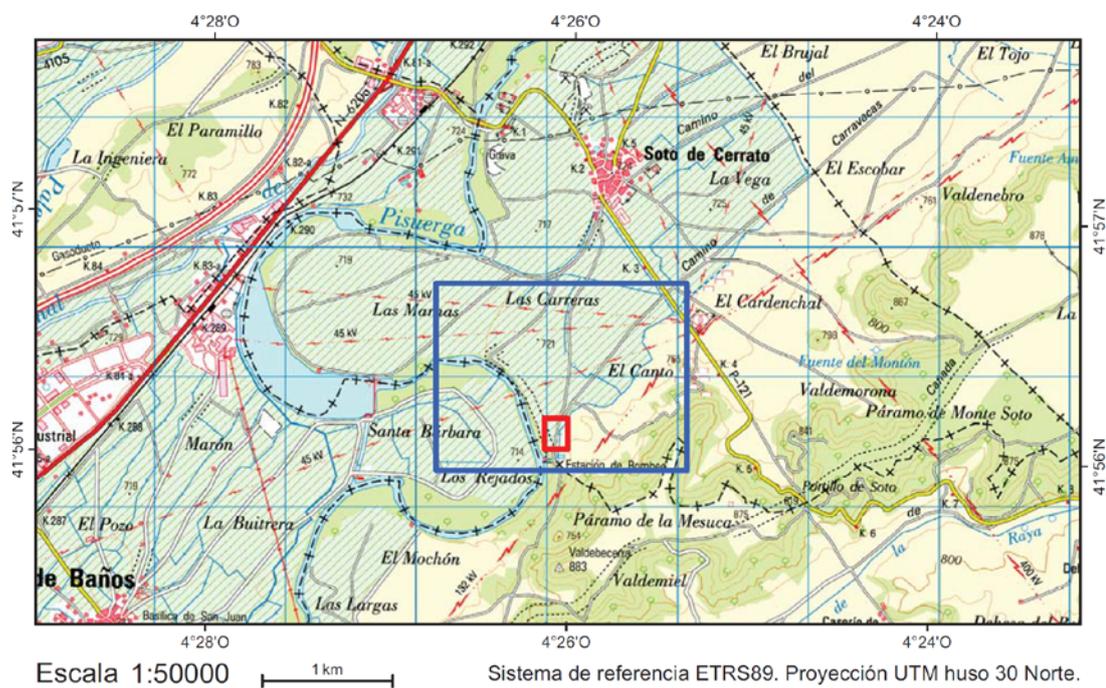


Ilustración 9. Situación de la parcela de Soto de Cerrato. Escalas Varias



Ilustración 10. Ortofoto del vuelo de la parcela de Soto de Cerrato insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2014

2.4. SARRACÍN DE ALISTE (ZAMORA)

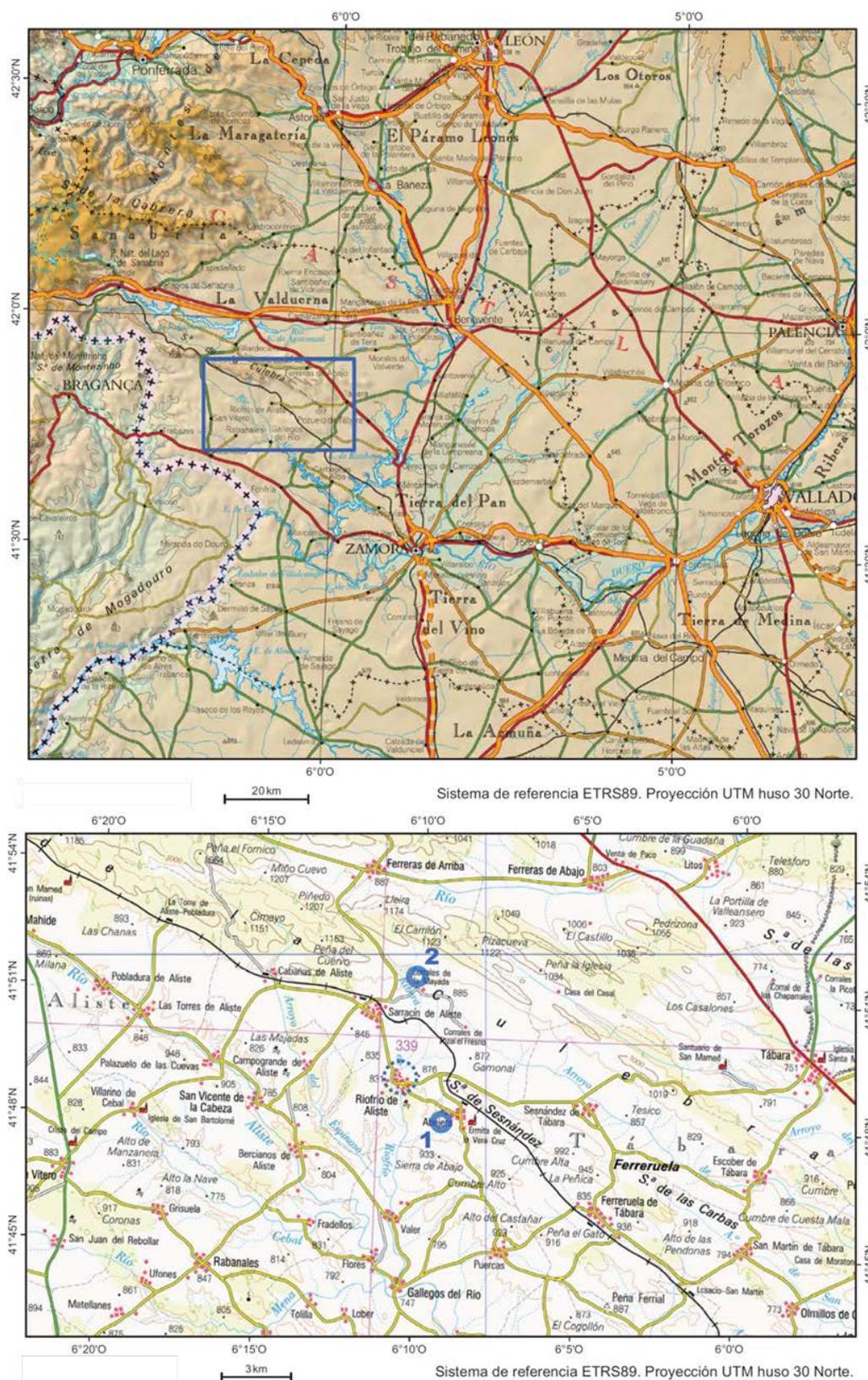


Ilustración 11. Situación de la parcela de Sarracín de Aliste (número 2). Escalas varias



Ilustración 12. Ortofoto del vuelo de la parcela de Sarracín de Aliste insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2013

2.5. FUENSALDAÑA (VALLADOLID)



Ilustración 13. Situación de parcela de Fuensaldaña. Escalas varias

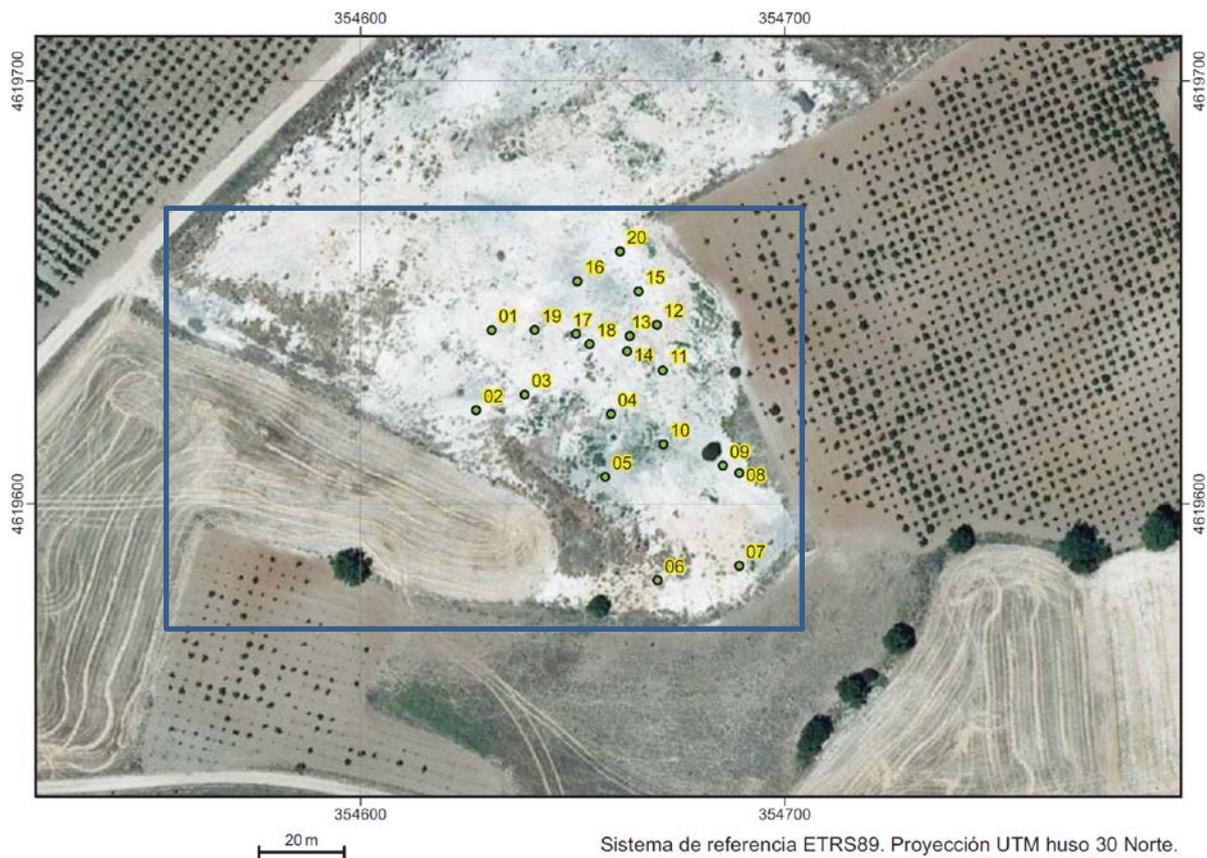


Ilustración 14. Parcela de Fuensaldaña con puntos de muestreo del Proyecto LIFE+: “Los Desiertos Verdes”. En azul área monitorizada.

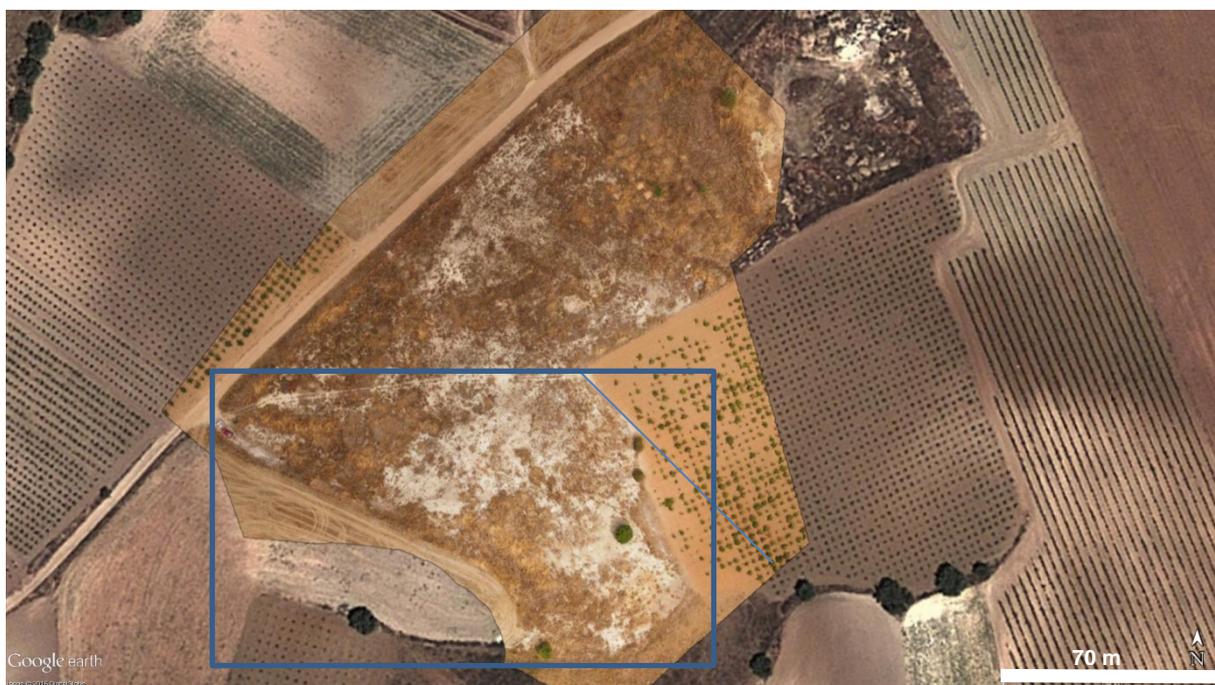


Ilustración 15. Ortofoto del vuelo de la parcela de Fuensaldaña insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. En azul parcela monitorizada. Años 2013 y 2014

2.6. MATALLANA 1

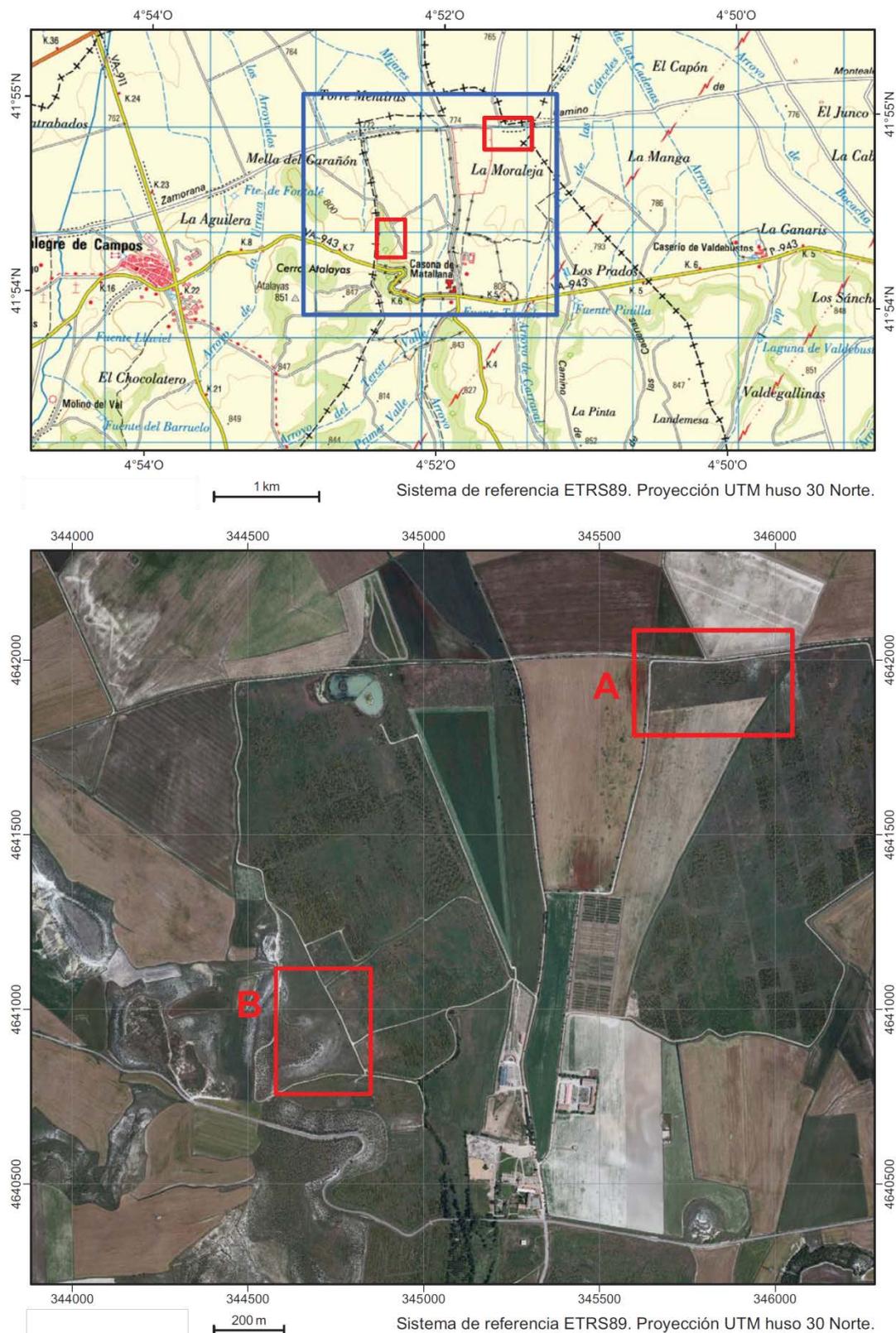


Ilustración 16. Situación de la parcela de la finca de Matallana 1. Zona A. Escalas varias



Ilustración 17. Ortofoto del vuelo de la parcela de Matallana 1 insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2014

2.7. SAN ISIDRO (LEÓN)

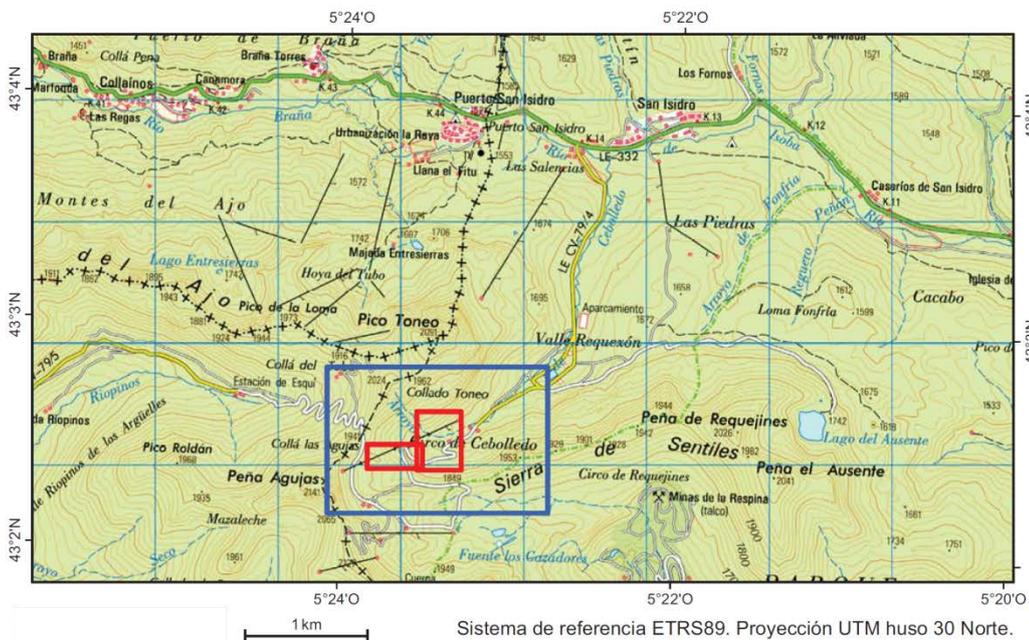
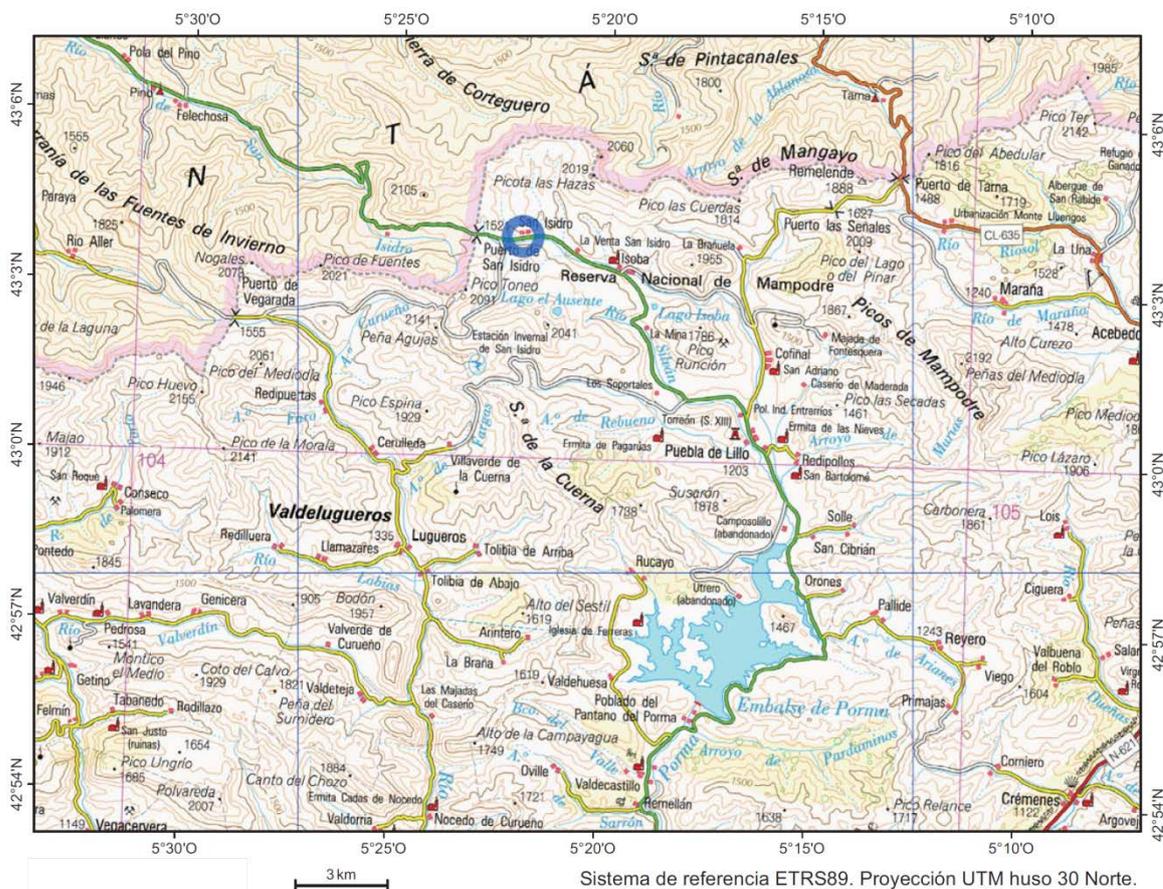


Ilustración 18. Situación de la parcela de San Isidro. Escalas varias

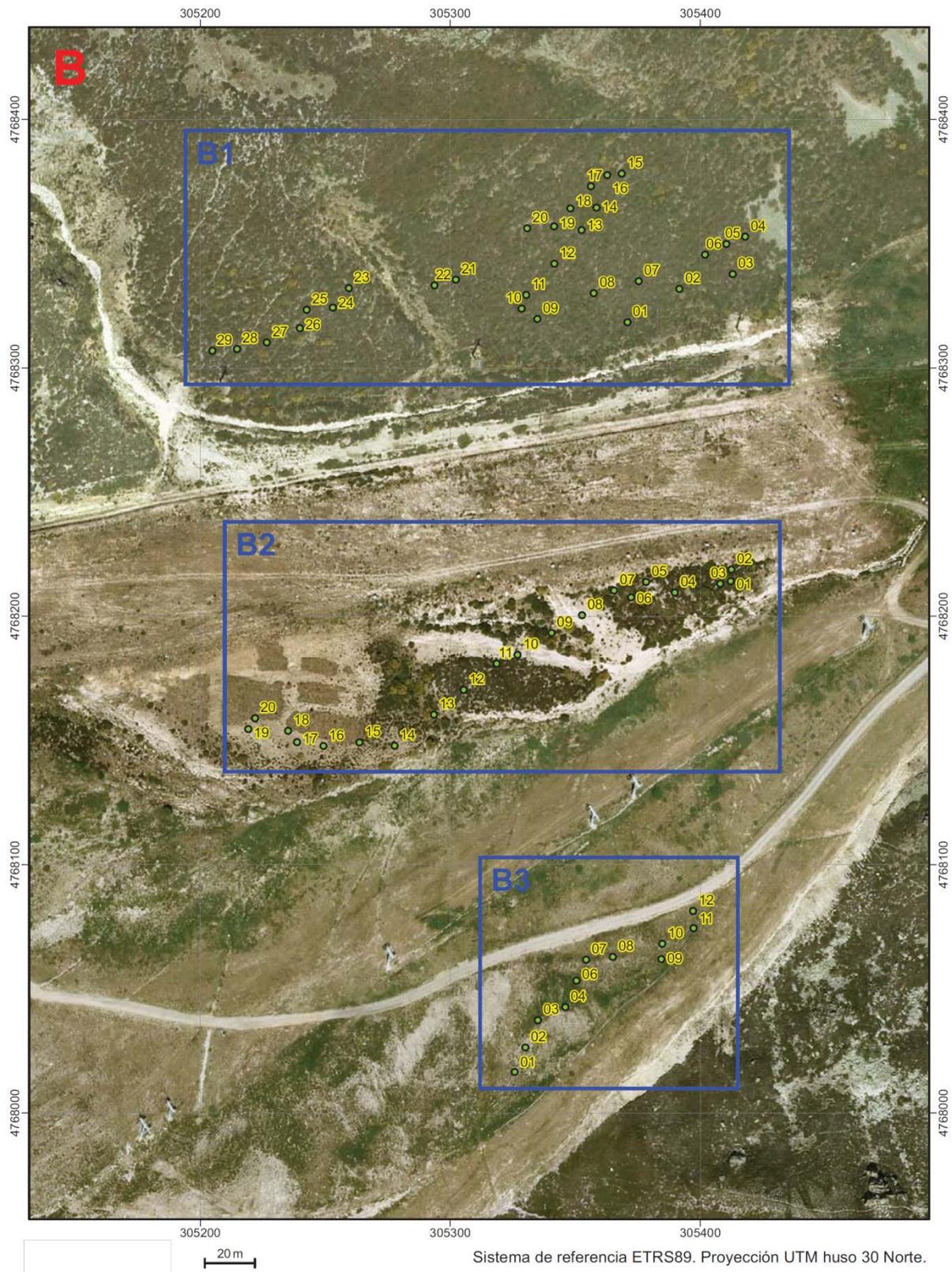


Ilustración 19. Zona monitorizada de San Isidro con puntos de muestreo del Proyecto LIFE+: “Los Desiertos Verdes”

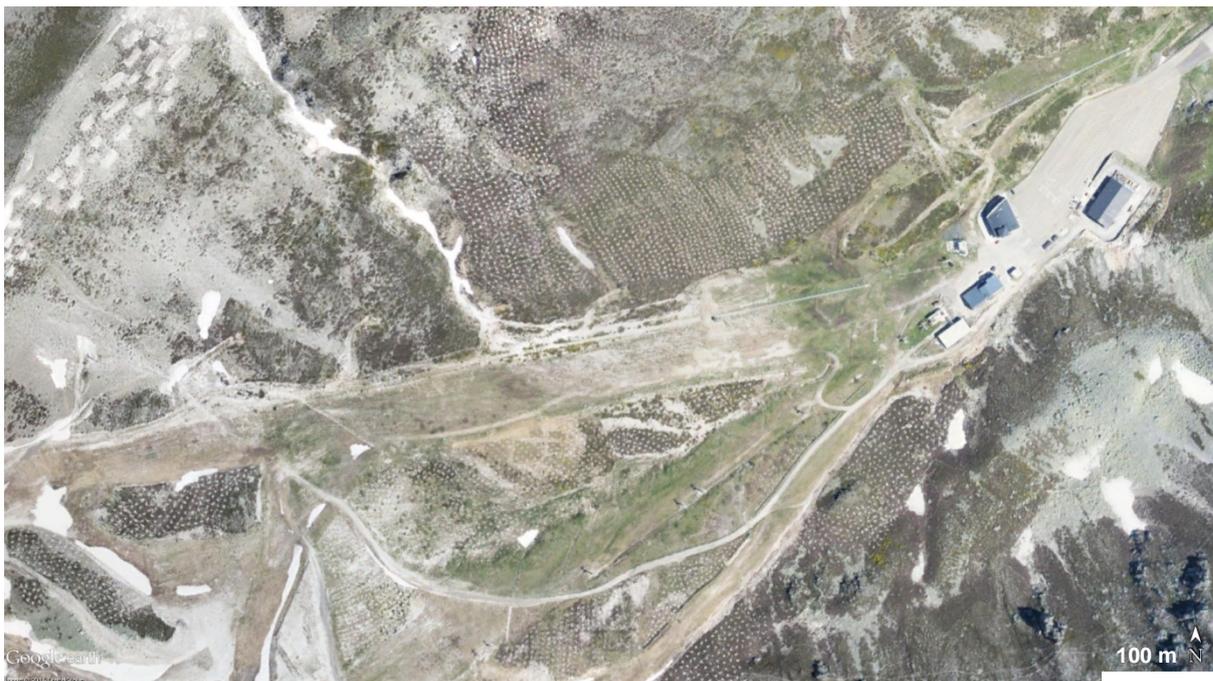


Ilustración 20. Detalle de la ortofoto del vuelo de las parcelas analizadas en San Isidro insertadas en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015

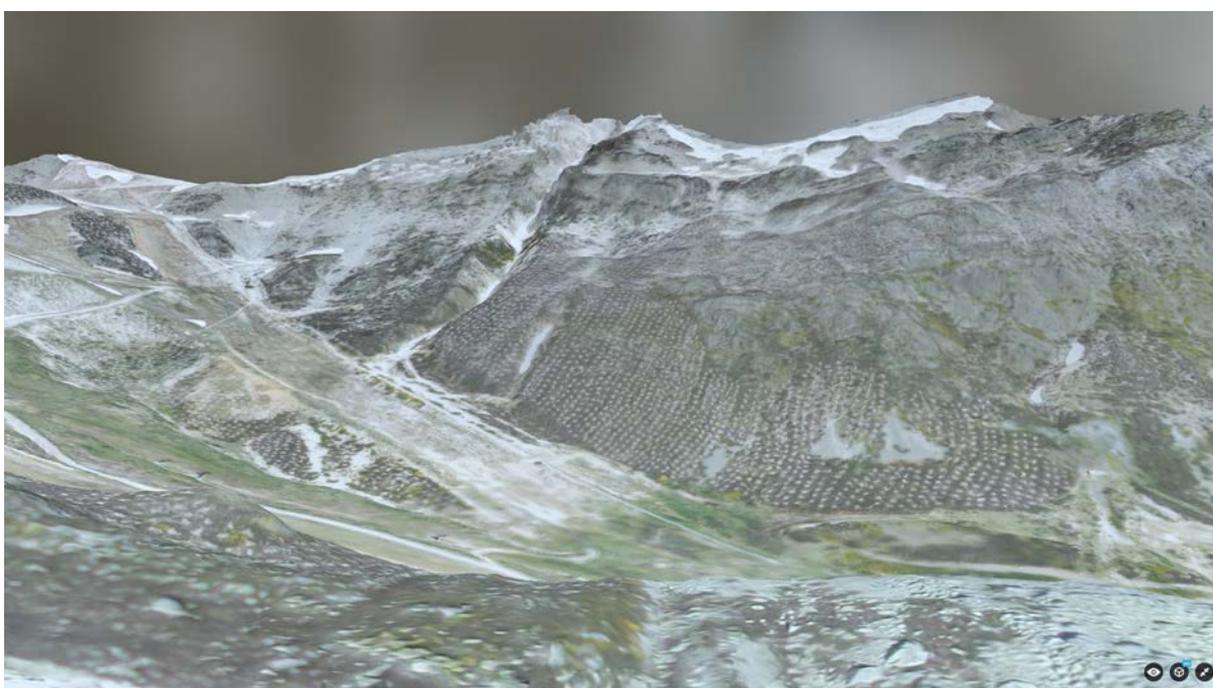


Ilustración 21. Detalle del modelo 3D de la parte volada de la estación de esquí de San Isidro. Sin Escala. Año 2015

2.8. RIOFRÍO DE ALISTE (ZAMORA)

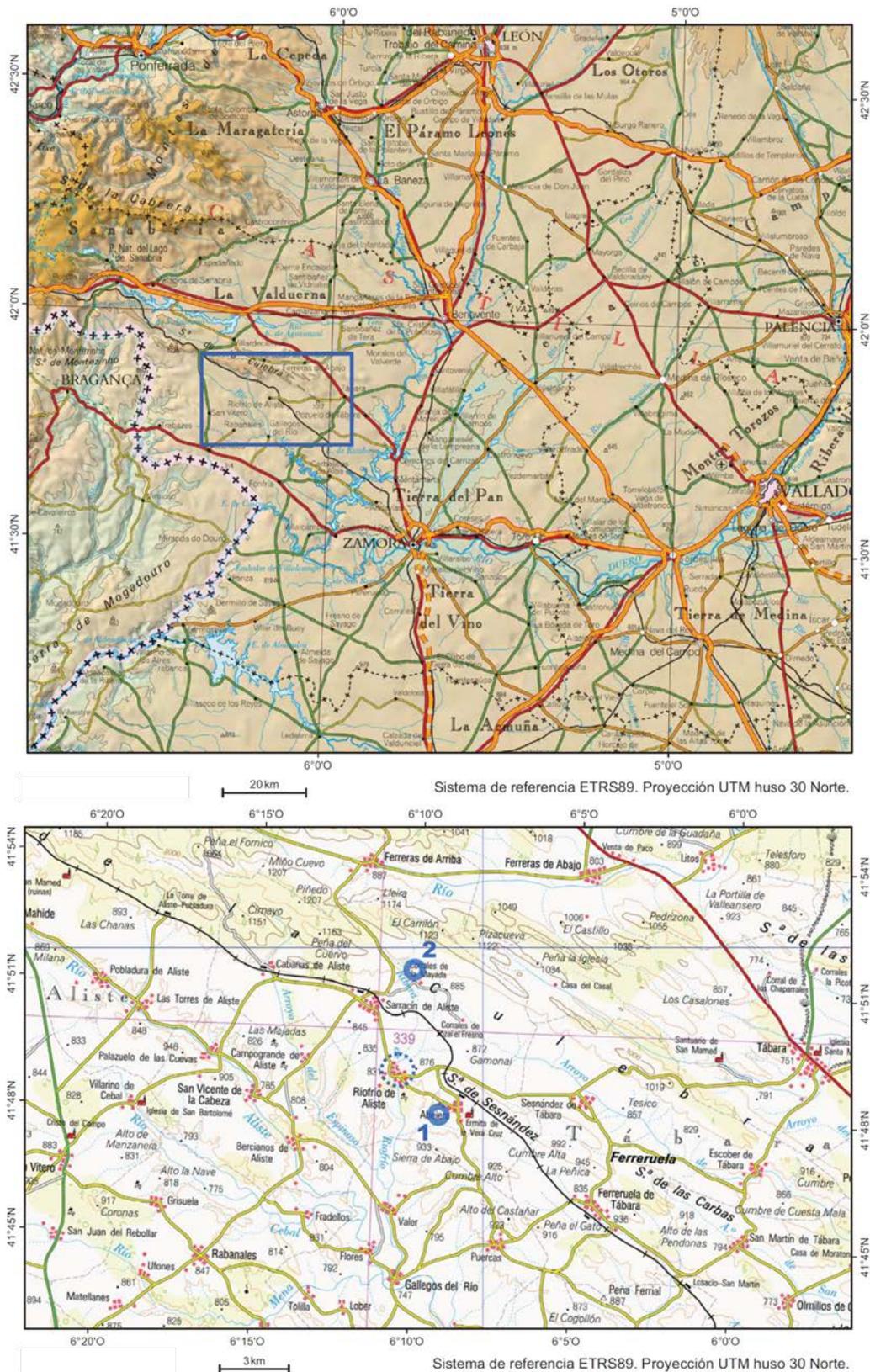


Ilustración 22. Situación de la parcela de Riofrío de Aliste (número 1). Escalas varias



Ilustración 23. Ortofoto general del vuelo de la cantera de Riofrío de Aliste insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015



Ilustración 24. Ortoimagen detallada de la parte monitorizada de la cantera de Riofrío de Aliste insertada en Google Earth. Sistema de referncia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015



Ilustración 25. Detalle 1 Modelo 3D de la cantera de Riofrío de Aliste. Sin Escala



Ilustración 26. Detalle 2 Modelo 3D de la cantera de Riofrío de Aliste. Sin Escala



Ilustración 27. Detalle 3 Modelo 3D de la cantera de Riofrío de Aliste. Sin Escala



Ilustración 28. Detalle 4 Modelo 3D de la cantera de Riofrío de Aliste. Sin Escala

2.9. PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN (VALLADOLID)

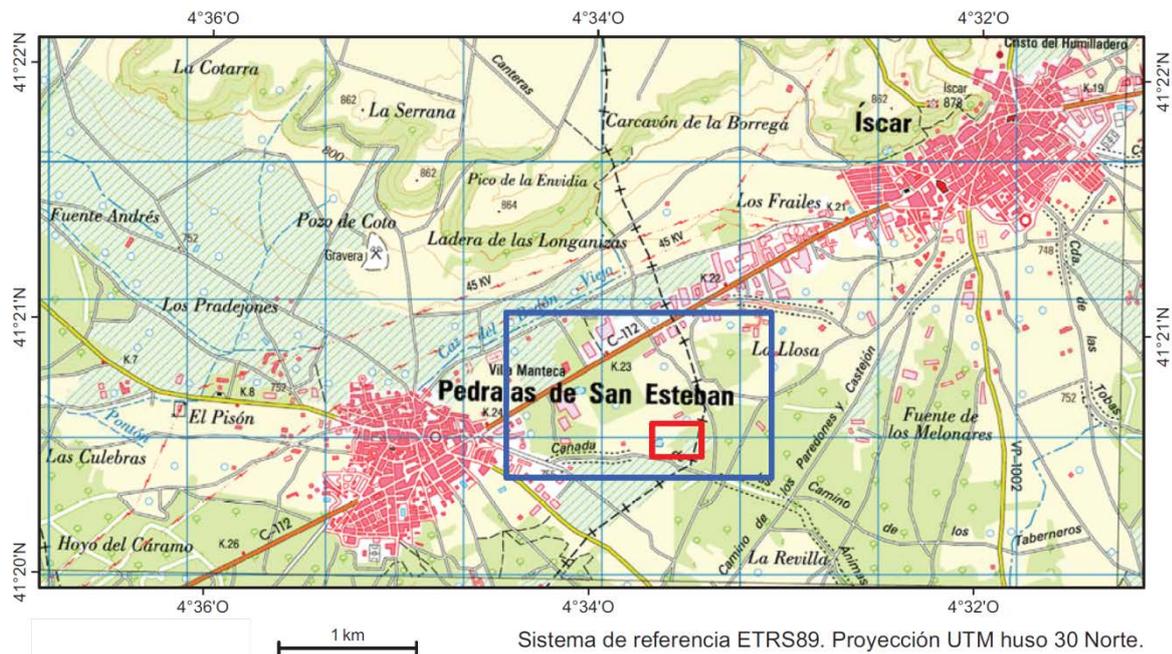


Ilustración 29. Situación de la parcela de Pedrajas de San Esteban. Escalas varias



Ilustración 30. Ortofoto del vuelo de la parcela de Pedrajas de San Esteban insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. En blanco, la parte de la parcela monitorizada. Año 2015

2.10. MATALLANA 2

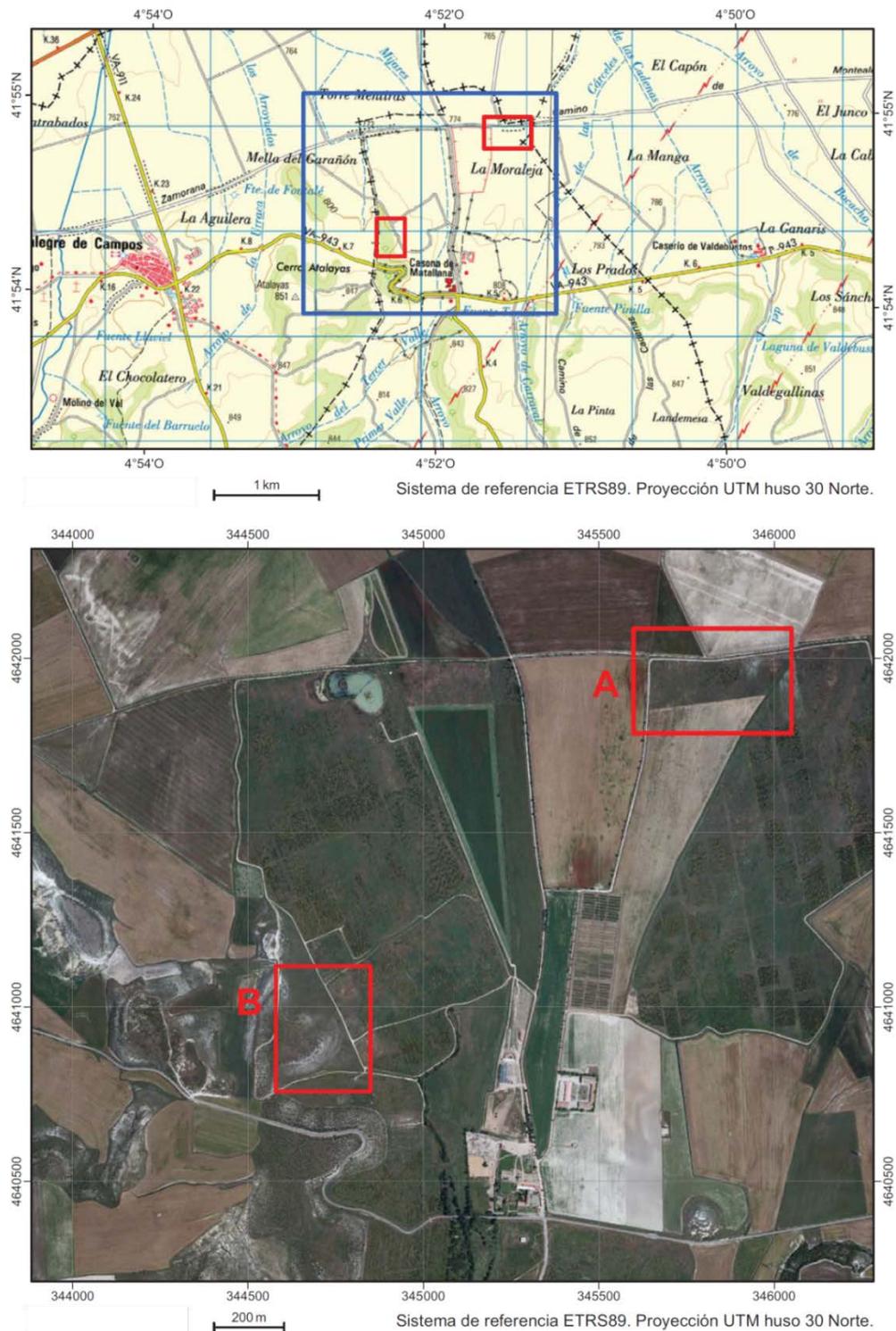


Ilustración 31. Situación de la parcela de la finca de Matallana 2. (Zona B). Escalas varias

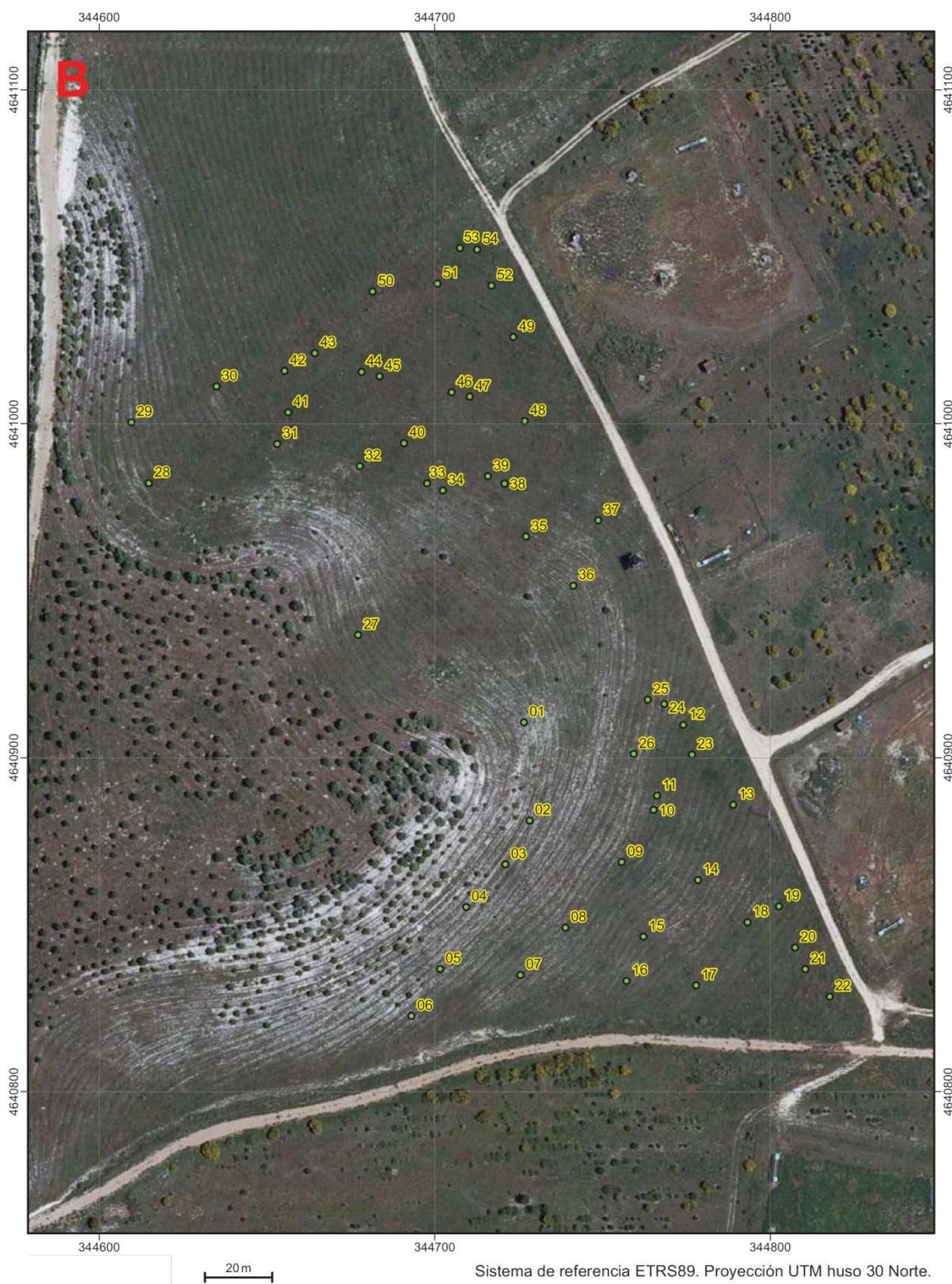


Ilustración 32. Zona monitorizada de la finca de Matallana 2 con puntos de muestreo del Proyecto LIFE*: “Los desiertos Verdes”

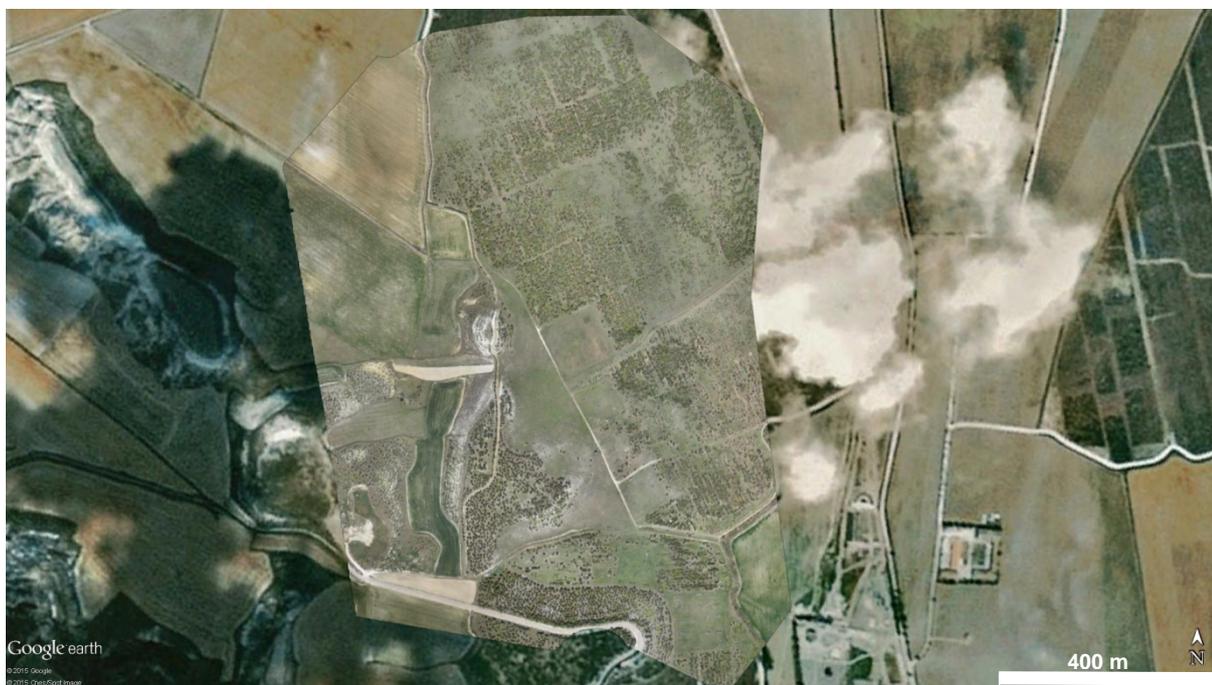


Ilustración 33. Ortofoto del vuelo con Skywalker de la parcela de Matallana 2 insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015



Ilustración 34. Ortofoto con detalle de los Waterboxx de la zona monitorizada de la parcela de Matallana 2 insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015

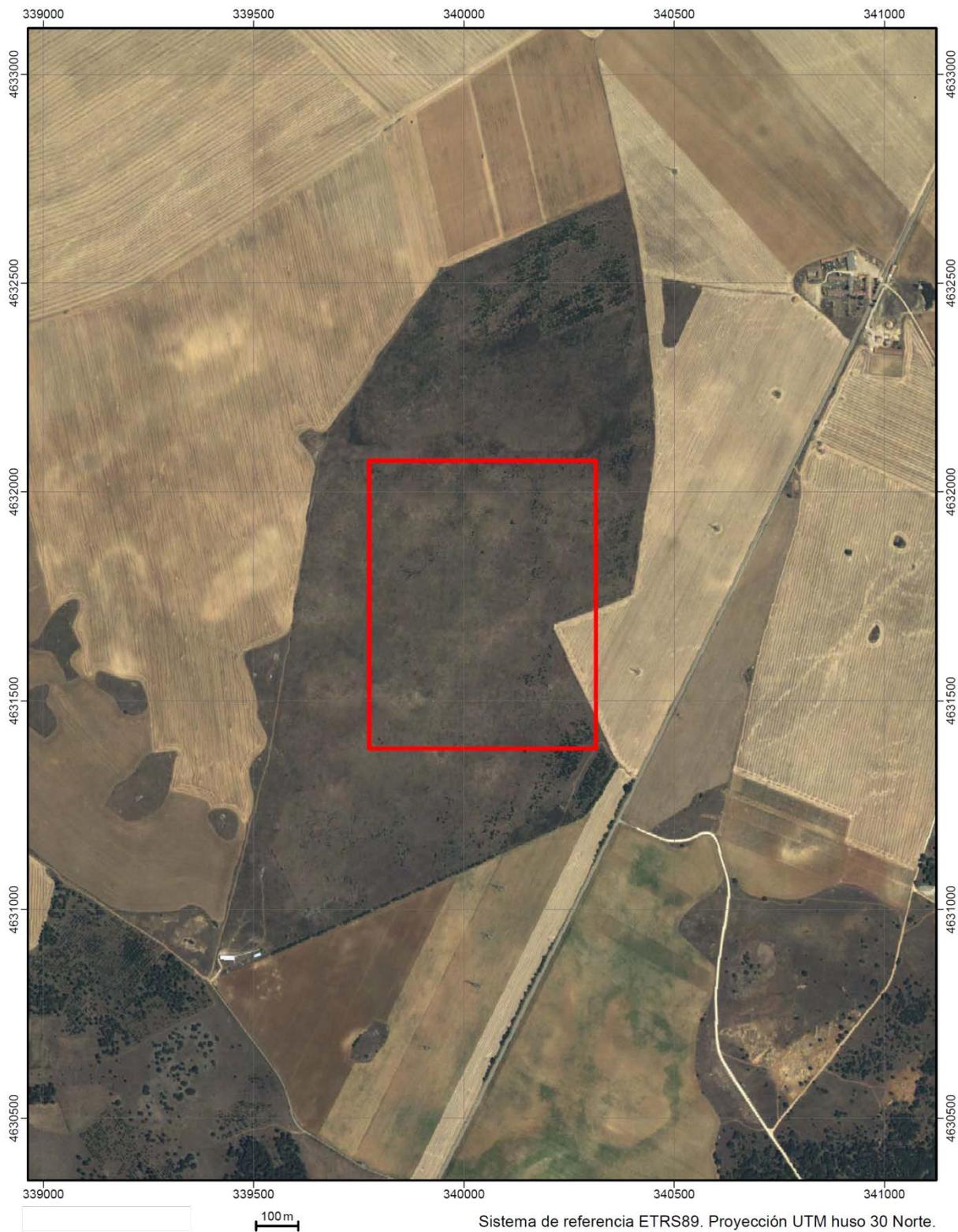


Ilustración 36. Localización de la parcela de La Mudarra



Ilustración 37. Ortofoto del vuelo con Skywalker de la parcela de La Mudarra insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015



Ilustración 38. Ortofoto del detalle de los Waterboxx de la zona monitorizada de la parcela de La Mudarra insertada en Google Earth. Sistema de referencia ETRS89. Proyección UTM huso 30 Norte. Año 2015

ANEJO 3. COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL

Tabla 13. Coordenadas de los puntos de control. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

	PARCELA	PC	COORDENADA X	COORDENADA Y	COORDENADA Z
2011	Villarramiel	Point 1	341680.515	4656826.018	819.946
		Point 2	341689.663	4656849.012	815.939
		Point 3	341724.682	4656873.022	815.894
		Point 4	341767.126	4656860.557	815.772
		Point 5	341752.925	4656829.213	815.680
		Point 6	341708.742	4656843.324	815.756
		Point 7	341732.827	4656850.908	815.663
2012	San Mateo de Gállego	Point 1	693266.310	4641140.260	ND
		Point 2	693236.742	4641156.276	ND
		Point 3	693216.111	4641118.544	ND
		Point 4	693247.785	4641106.760	ND
		Point 5	693271.253	4641121.640	ND
		Point 6	693285.523	4641144.789	ND
2013	Soto de Cerrato	Point 1	381077.711	4643668.472	728.335
		Point 2	380990.531	4643666.962	725.389
		Point 3	380937.031	4643689.764	724.167
		Point 4	380922.377	4643623.813	724.292
		Point 5	380941.844	4643581.220	724.079
		Point 6	380990.057	4643492.960	726.416
		Point 7	381053.335	4643505.669	728.065
		Point 8	381069.790	4643602.801	727.647
	Sarracín de Aliste	Point 1	735214.757	4638048.246	909.324
		Point 2	735178.916	4638082.042	908.212
		Point 3	735134.672	4637978.484	905.027
		Point 4	735101.982	4637897.605	901.755
		Point 5	735144.836	4637876.687	904.251
		Point 6	735187.476	4637856.709	905.024
		Point 7	735215.073	4637918.117	907.048
		Point 8	735170.508	4637944.943	906.448
		Point 10	735253.482	4638007.223	909.580
		Fuensaldaña	Point 1	354570.709	4619655.529
	Point 2		354570.297	4619637.489	796.039
	Point 3		354605.772	4619622.061	796.382
Point 4	354657.636		4619580.874	795.853	
Point 5	354698.808		4619593.125	796.077	
Point 6	354685.509		4619635.076	797.558	
Point 7	354670.217		4619660.396	798.524	
Point 8	354642.354		4619662.381	798.772	
Point 10	354639.150		4619626.166	798.920	
2014	Soto de Cerrato		Point 1	381071.906	4643645.104
		Point 2	381050.092	4643552.955	727.675
		Point 3	381028.58	4643462.391	728.592
		Point 4	380962,241	4643553.751	725.204
		Point 5	380977.403	4643610.039	725.828
		Point 6	380989,144	4643666.619	725.765
	Matallana 1	Point 7	345959.165	4641889.080	770.110
		Point 8	345929,053	4641847.349	770.498
		Point 10	345904.259	4641803.223	770.932

2015	Fuensaldaña	Point 11	345866,744	4641795.067	771.136	
		Point 12	345822.717	4641792.36	771.164	
		Point 13	345814,464	4641870.008	770.930	
		Point 13	354624.807	4619660.942	799.582	
		Point 14	354676,124	4619653.921	798.632	
		Point 15	354696.950	4619599.936	796.497	
		Point 16	354680.600	4619577.308	796.277	
		Point 17	354610,252	4619631.950	797.929	
		San Isidro	Point 1	305543.330	4768310.220	1684.300
			Point 2	305378,320	4768305.830	1708.010
	Point 3		305272.520	4768205.410	1730.110	
	Point 4		305310,620	4768114.880	1727.360	
	Point 5		304997.420	4768164.170	1810.570	
	Point 6		305127,420	4767861.130	1843.640	
	Point 7		304671.250	4768052.020	1917.720	
	Point 8		305355,950	4767833.330	1839.890	
	Point 9		305292.640	4767896.700	1800.330	
	Point 10		305359,010	4768014.290	1753.460	
	Point 11		305450.060	4768106.860	1718.160	
	Riofrío de Aliste	Point 1	237876.590	4632350.720	800.500	
		Point 2	237863.960	4632328.390	803.100	
		Point 3	237842.540	4632288.450	808.200	
		Point 4	237853.060	4632290.080	802.490	
		Point 5	237863,000	4632317.380	801.750	
		Point 6	237891.810	4632349.720	791.780	
		Point 7	237880.640	4632318.400	791.970	
		Point 8	237869.480	4632289.860	792.290	
		Point 9	237779.420	4632417.340	819.770	
		Point 10	237827.510	4632358.120	819.250	
		Point 11	237814.250	4632309.650	818.750	
		Point 12	237812.150	4632414.460	807.290	
	Pedrajas de San Esteban	Point 1	369546.660	4578035.480	750.540	
		Point 2	369509.560	4577985.650	750.400	
		Point 3	369455.670	4577890.820	750.580	
		Point 4	369499.890	4577826.880	750.310	
		Point 5	369542.940	4577819.040	750.510	
		Point 6	369571.080	4577872.360	750.560	
		Point 7	369550.690	4577900.020	750.180	
		Point 8	369590.220	4577936.220	750.330	
		Point 9	369639.640	4578010.270	750.540	
Point 10		369653.370	4578060.170	750.600		
Point 11		369600.040	4578060.630	750.490		
San Mateo de Gállego	Point 1	693164.980	4640925.060	406.510		
	Point 2	693398.720	4640903.670	411.780		
	Point 3	693409.600	4641082.230	415.510		
	Point 4	693263.020	4641123.250	410.690		
	Point 5	693255.870	4641297.050	416.210		
	Point 6	692978.820	4641360.240	415.890		
	Point 7	692696.980	4641528.010	417.180		
	Point 8	692599.700	4641295.380	405.090		
	Point 9	692776.600	4641232.710	407.620		
	Point 10	692890.130	4641152.490	409.110		
	Point 11	693066.480	4641084.270	407.270		

ANEJO 4. FICHERO DE VUELO

PARCELA DE VILLARRAMIEL (PALENCIA)

Tabla 14. Ejemplo de fichero de vuelo de la parcela de Villarramiel. Año 2012

Latitud	Longitud	Altura	Altura sensor	Alabeo	Cabeceo	Guiñada	Incl. Cámara	Hora	Foto
VUELO 13.7 METROS									
42.048104°	-4.912560°	833.1m	13.8m	-3°	-10°	108°	68°	11:53:30	528
42.048073°	-4.912496°	833.6m	13.9m	-3°	-4°	106°	68°	11:53:46	529
42.048063°	-4.912400°	834.2m	14.3m	-8°	-7°	112°	68°	11:54:01	530
42.048060°	-4.912337°	833.6m	13.7m	-3°	-4°	108°	68°	11:54:18	531
42.048006°	-4.912158°	833.2m	14.0m	-5°	-8°	109°	68°	11:54:52	532
42.047985°	-4.912059°	834.4m	14.6m	-8°	-12°	112°	68°	11:55:07	533
42.047966°	-4.911962°	833.3m	13.9m	-4°	-5°	110°	68°	11:55:23	534
42.047969°	-4.911965°	832.8m	13.8m	-3°	2°	113°	68°	11:55:26	535
42.047948°	-4.911894°	834.5m	14.0m	-6°	-5°	115°	68°	11:55:39	536
42.047933°	-4.911803°	835.6m	13.3m	-1°	-5°	109°	68°	11:55:55	537
42.047854°	-4.911860°	834.0m	13.9m	6°	9°	-72°	68°	11:56:17	538
42.047855°	-4.911897°	833.3m	14.4m	4°	2°	-71°	68°	11:56:28	539
42.047880°	-4.912000°	832.5m	13.7m	5°	6°	-72°	68°	11:56:39	540
42.047901°	-4.912074°	834.5m	13.5m	3°	3°	-71°	68°	11:56:50	541
42.047924°	-4.912159°	833.0m	13.6m	2°	9°	-71°	68°	11:57:02	542
42.047932°	-4.912235°	833.2m	13.0m	3°	7°	-73°	68°	11:57:13	543
42.047955°	-4.912322°	833.3m	12.9m	3°	7°	-72°	68°	11:57:24	544
42.047969°	-4.912415°	833.8m	13.5m	5°	5°	-74°	68°	11:57:37	545
42.047995°	-4.912494°	833.4m	13.7m	4°	4°	-75°	68°	11:57:50	546
42.048004°	-4.912588°	833.3m	14.0m	8°	5°	-74°	68°	11:58:02	547
42.048028°	-4.912670°	833.3m	13.6m	7°	6°	-72°	68°	11:58:14	548
42.047964°	-4.912726°	835.3m	14.1m	-5°	-2°	111°	68°	11:58:35	549
42.047926°	-4.912634°	836.2m	15.4m	-5°	-2°	112°	68°	11:58:52	550
42.047907°	-4.912562°	834.1m	13.9m	-9°	-6°	115°	68°	11:59:07	551
42.047890°	-4.912452°	834.3m	13.7m	-5°	1°	102°	68°	11:59:22	552
42.047873°	-4.912375°	833.2m	13.7m	-4°	-5°	112°	68°	11:59:38	553
42.047837°	-4.912291°	833.5m	13.3m	-4°	1°	106°	68°	11:59:53	554
42.047835°	-4.912198°	833.6m	13.7m	-6°	-0°	107°	68°	12:00:08	555
42.047816°	-4.912145°	833.3m	12.6m	-4°	4°	109°	68°	12:00:23	556
42.047794°	-4.912036°	833.3m	13.9m	-7°	-3°	104°	68°	12:00:38	557
42.047765°	-4.911947°	833.5m	14.2m	-9°	-0°	104°	68°	12:00:54	558
42.047764°	-4.911877°	833.7m	13.9m	-5°	-2°	105°	68°	12:01:09	559
42.047682°	-4.911910°	832.4m	12.6m	-0°	4°	-78°	68°	12:01:30	560
42.047678°	-4.911980°	833.1m	13.0m	-0°	5°	-75°	68°	12:01:42	561
42.047711°	-4.912082°	832.6m	13.3m	7°	6°	-73°	68°	12:01:56	562

42.047724°	-4.912152°	833.4m	14.2m	4°	5°	-74°	68°	12:02:08	563
42.047742°	-4.912239°	833.2m	13.7m	7°	3°	-76°	68°	12:02:21	564
42.047761°	-4.912310°	832.6m	13.7m	1°	7°	-72°	68°	12:02:32	565
42.047782°	-4.912410°	832.8m	13.4m	2°	5°	-74°	68°	12:02:46	566
42.047793°	-4.912472°	833.3m	13.7m	0°	3°	-75°	68°	12:02:59	567
42.047820°	-4.912571°	833.2m	13.9m	9°	-1°	-76°	68°	12:03:11	568
42.047831°	-4.912650°	833.3m	14.0m	1°	1°	-76°	68°	12:03:23	569
42.047856°	-4.912741°	833.8m	14.0m	8°	13°	-74°	68°	12:03:35	570
42.047795°	-4.912772°	834.1m	14.1m	-1°	-0°	108°	68°	12:03:56	571
42.047741°	-4.912711°	833.9m	14.0m	-10°	-8°	106°	68°	12:04:11	572
42.047732°	-4.912613°	833.4m	14.1m	-7°	2°	106°	68°	12:04:26	573
42.047717°	-4.912535°	833.5m	14.3m	-4°	-3°	108°	68°	12:04:41	574
42.047711°	-4.912447°	832.6m	13.7m	0°	-7°	113°	68°	12:04:57	575
42.047671°	-4.912371°	832.7m	13.4m	-7°	-8°	110°	68°	12:05:13	576
42.047672°	-4.912273°	833.6m	13.7m	-4°	-3°	110°	68°	12:05:28	577
42.047645°	-4.912191°	833.7m	13.8m	-2°	-1°	109°	68°	12:05:44	578
42.047627°	-4.912116°	834.4m	14.0m	-3°	-5°	111°	68°	12:05:59	579
42.047599°	-4.912038°	832.7m	14.0m	-5°	-6°	110°	68°	12:06:15	580
42.047596°	-4.911942°	833.5m	14.4m	-4°	-7°	113°	68°	12:06:30	581
42.047522°	-4.911988°	833.3m	13.7m	-0°	8°	-68°	68°	12:06:52	582
42.047510°	-4.912048°	832.5m	13.3m	2°	8°	-75°	68°	12:07:03	583
42.047548°	-4.912213°	832.6m	13.2m	1°	3°	-76°	68°	12:07:26	584
42.047570°	-4.912304°	833.5m	13.8m	2°	6°	-75°	68°	12:07:39	585
42.047575°	-4.912379°	833.5m	14.1m	12°	-2°	-75°	68°	12:07:51	586
42.047596°	-4.912479°	835.6m	16.3m	14°	15°	-67°	68°	12:08:03	587
42.047617°	-4.912663°	834.0m	13.8m	5°	10°	-68°	68°	12:08:12	588
VUELO 18 METROS									
42.048092°	-4.912675°	839.8m	17.3m	-5°	-9°	109°	68°	12:23:02	590
42.048067°	-4.912526°	840.4m	17.8m	-5°	-6°	109°	68°	12:23:14	591
42.048016°	-4.912296°	842.0m	17.9m	-3°	-6°	109°	68°	12:23:46	592
42.047981°	-4.912193°	838.8m	18.5m	-5°	-7°	109°	68°	12:24:02	593
42.047984°	-4.912190°	838.1m	17.7m	-8°	-8°	109°	68°	12:24:04	594
42.047969°	-4.912050°	838.0m	18.4m	-3°	-7°	108°	68°	12:24:17	595
42.047936°	-4.911948°	837.8m	17.8m	-2°	-7°	108°	68°	12:24:32	596
42.047919°	-4.911815°	839.6m	18.2m	-1°	-1°	108°	68°	12:24:48	597
42.047833°	-4.912107°	838.2m	18.9m	9°	8°	-74°	68°	12:25:30	598
42.047864°	-4.912228°	837.9m	18.4m	4°	6°	-73°	68°	12:25:43	599
42.047884°	-4.912338°	836.5m	17.5m	6°	5°	-73°	68°	12:25:55	600
42.047913°	-4.912456°	837.9m	18.8m	5°	8°	-74°	68°	12:26:06	601
42.047937°	-4.912584°	837.1m	18.3m	4°	2°	-73°	68°	12:26:18	602
42.047972°	-4.912695°	838.2m	18.2m	4°	9°	-73°	68°	12:26:30	603
42.047863°	-4.912758°	837.4m	18.1m	-4°	-5°	110°	68°	12:26:50	604
42.047779°	-4.912517°	836.0m	17.4m	-4°	-3°	108°	68°	12:27:21	605
42.047756°	-4.912384°	837.7m	18.1m	-4°	3°	106°	68°	12:27:35	606
42.047735°	-4.912282°	837.8m	18.5m	-3°	2°	104°	68°	12:27:52	607
42.047706°	-4.912155°	838.2m	18.1m	-2°	0°	107°	68°	12:28:11	608

42.047649°	-4.911942°	838.5m	18.3m	-7°	-6°	107°	68°	12:28:43	609
42.047545°	-4.911984°	838.5m	18.9m	3°	1°	-74°	68°	12:29:02	610
42.047546°	-4.912094°	837.3m	18.1m	3°	4°	-75°	68°	12:29:14	611
42.047570°	-4.912221°	837.0m	18.0m	8°	8°	-75°	68°	12:29:27	612
42.047599°	-4.912337°	837.1m	18.4m	12°	6°	-74°	68°	12:29:40	613
42.047627°	-4.912441°	838.3m	18.0m	3°	4°	-74°	68°	12:29:52	614
42.047674°	-4.912677°	838.7m	18.4m	4°	3°	-72°	68°	12:30:17	615
42.047701°	-4.912798°	837.9m	17.9m	4°	4°	-75°	68°	12:30:29	616
VUELO 22.5 METROS									
42.047898°	-4.911888°	841.3m	22.0m	5°	6°	-74°	68°	12:41:51	618
42.047933°	-4.911977°	838.4m	20.9m	5°	-1°	-75°	68°	12:42:02	619
42.047971°	-4.912136°	841.4m	23.2m	7°	7°	-72°	68°	12:42:15	620
42.047999°	-4.912284°	841.7m	22.0m	8°	5°	-73°	68°	12:42:28	621
42.048041°	-4.912440°	843.0m	24.2m	9°	6°	-74°	68°	12:42:40	622
42.048074°	-4.912602°	840.1m	22.1m	3°	6°	-74°	68°	12:42:52	623
42.047924°	-4.912691°	841.9m	22.5m	-8°	-6°	110°	68°	12:43:15	624
42.047856°	-4.912467°	843.2m	22.6m	-8°	-14°	110°	68°	12:43:32	625
42.047784°	-4.912254°	846.7m	24.5m	-13°	-7°	109°	68°	12:43:51	626
42.047769°	-4.912102°	844.3m	22.5m	-12°	-14°	109°	68°	12:44:08	627
42.047722°	-4.911903°	843.5m	22.9m	-12°	-13°	105°	68°	12:44:30	628
42.047727°	-4.911905°	842.3m	22.0m	-8°	-6°	109°	68°	12:44:36	629
42.047575°	-4.911988°	842.5m	22.1m	5°	9°	-74°	68°	12:45:01	630
42.047586°	-4.912139°	843.6m	21.8m	5°	3°	-73°	68°	12:45:12	631
42.047659°	-4.912428°	842.5m	22.5m	5°	6°	-72°	68°	12:45:36	632
42.047724°	-4.912732°	845.4m	22.8m	2°	5°	-68°	68°	12:46:02	633
VUELO LIBRE									
42.047847°	-4.912388°	899.4m	78.8m	10°	9°	-71°	68°	12:47:04	635
42.047847°	-4.912388°	899.4m	78.8m	10°	9°	-71°	68°	12:47:04	636
42.047845°	-4.912380°	924.4m	103.5m	11°	9°	-74°	68°	12:47:22	637
42.047844°	-4.912381°	924.5m	103.6m	12°	11°	-73°	68°	12:47:22	638
42.047780°	-4.912046°	920.8m	103.9m	7°	12°	-77°	68°	12:47:40	639
42.047779°	-4.912018°	925.2m	104.2m	10°	17°	-75°	68°	12:47:40	640
42.047779°	-4.912014°	925.4m	104.0m	7°	7°	-78°	68°	12:47:43	641
42.047790°	-4.912016°	898.2m	76.0m	8°	14°	-76°	68°	12:48:48	642
42.047790°	-4.912016°	898.2m	75.3m	6°	5°	-80°	68°	12:48:50	643
42.047789°	-4.912015°	897.1m	76.2m	6°	11°	-79°	68°	12:48:53	644
42.047789°	-4.912015°	897.1m	75.5m	6°	8°	-80°	68°	12:48:53	645
42.047802°	-4.912212°	897.3m	76.0m	10°	11°	-78°	68°	12:49:21	646
42.047803°	-4.912210°	897.1m	76.0m	9°	8°	-77°	68°	12:49:21	647

ANEJO 5. LISTADO DE WATERBOXX ANALIZADOS

5.1. FUENSALDAÑA. AÑO 2013

Tabla 15. Coordenadas de plantas dudosas en Fuensaldaña. Año 2013. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)	Observaciones
WTBXX20	354655.952	4619657.269	798.713	
WTBXX35	354654.031	4619646.493	798.574	
WTBXX37	354653.445	4619641.947	798.599	
WTBXX65	354653.391	4619633.720	798.691	Parcialmente cubierto
WTBXX119	354679.227	4619591.507	796.957	
WTBXX130	354657.245	4619597.228	797.642	Parcialmente cubierto
WTBXX134	354655.038	4619610.361	798.518	
WTBXX138	354632.000	4619610.845	797.578	
WTBXX151	354623.462	4619626.005	798.212	
WTBXX152	354626.118	4619627.891	798.536	
WTBXX173	354641.390	4619642.585	798.871	
WTBXX181	354648.912	4619639.525	798.555	Parcialmente cubierto

5.2. FUENSALDAÑA. AÑO 2014

Tabla 16. Coordenadas de plantas analizadas en Fuensaldaña. Año 2014. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)	Estado
point 100	354661.752	4619660.480	798.712	VIVA
point 101	354668.221	4619659.279	798.673	VIVA
point 102	354658.640	4619658.960	798.757	VIVA
point 103	354663.859	4619658.323	798.593	VIVA
point 104	354655.944	4619657.270	798.722	VIVA
point 105	354660.649	4619656.755	798.682	VIVA
point 106	354666.089	4619655.652	798.498	VIVA
point 107	354670.965	4619656.436	798.518	VIVA
point 108	354654.989	4619654.868	798.721	VIVA
point 109	354663.026	4619654.329	798.580	VIVA
point 110	354651.607	4619654.011	798.645	VIVA
point 111	354655.626	4619652.614	798.632	VIVA
point 112	354660.722	4619652.369	798.526	VIVA
point 113	354665.672	4619651.609	798.551	VIVA
point 114	354668.417	4619652.957	798.481	VIVA
point 115	354649.647	4619652.418	798.671	VIVA
point 116	354654.156	4619651.168	798.634	VIVA
point 117	354652.244	4619649.869	798.623	VIVA
point 118	354658.223	4619649.698	798.595	VIVA
point 119	354656.018	4619648.179	798.642	VIVA
point 120	354663.541	4619649.664	798.553	VIVA
point 121	354660.933	4619646.925	798.609	VIVA
point 122	354668.518	4619648.338	798.422	VIVA
point 123	354670.996	4619649.751	798.471	VIVA
point 124	354676.277	4619649.881	798.371	VIVA
point 125	354673.082	4619647.230	798.521	VIVA
point 126	354644.210	4619649.515	798.806	VIVA
point 127	354649.117	4619647.993	798.695	VIVA
point 128	354654.042	4619646.505	798.619	VIVA
point 129	354640.414	4619651.703	798.716	DUDOSA
point 130	354646.655	4619646.659	798.768	VIVA
point 131	354651.118	4619645.223	798.698	VIVA
point 132	354653.460	4619642.008	798.667	VIVA

point 133	354651.169	4619641.222	798.663	VIVA
point 134	354647.254	4619643.188	798.842	VIVA
point 135	354644.278	4619645.240	798.772	VIVA
point 136	354638.687	4619646.198	798.810	VIVA
point 137	354641.235	4619643.376	798.966	VIVA
point 138	354636.139	4619644.949	798.936	VIVA
point 139	354638.636	4619641.068	798.944	VIVA
point 140	354633.660	4619643.308	798.963	VIVA
point 141	354648.895	4619639.563	798.631	VIVA
point 142	354656.145	4619638.999	798.667	VIVA
point 143	354630.531	4619641.273	798.992	VIVA
point 144	354641.714	4619648.882	798.755	DUDOSA
point 145	354628.518	4619639.813	799.013	VIVA
point 146	354641.255	4619637.596	798.997	VIVA
point 147	354633.365	4619637.531	799.190	VIVA
point 148	354631.192	4619636.335	799.185	VIVA
point 149	354628.888	4619634.922	799.109	VIVA
point 150	354626.432	4619633.488	798.899	VIVA
point 151	354635.734	4619634.162	799.102	VIVA
point 152	354633.669	4619632.532	799.218	VIVA
point 153	354628.649	4619629.554	798.881	VIVA
point 154	354626.106	4619627.924	798.600	VIVA
point 155	354623.476	4619626.120	798.260	VIVA
point 156	354651.013	4619636.552	798.599	VIVA
point 157	354646.688	4619635.900	798.792	VIVA
point 158	354643.710	4619634.509	798.953	VIVA
point 159	354636.560	4619629.119	799.214	VIVA
point 160	354633.191	4619628.859	799.186	VIVA
point 161	354634.300	4619627.033	799.209	VIVA
point 162	354630.735	4619625.164	798.878	VIVA
point 163	354628.236	4619623.773	798.571	VIVA
point 164	354639.016	4619625.707	799.171	VIVA
point 165	354641.211	4619626.946	799.069	VIVA
point 166	354643.841	4619629.511	799.008	VIVA
point 167	354646.623	4619630.663	798.771	VIVA
point 168	354625.490	4619622.309	798.368	VIVA
point 169	354624.425	4619616.658	797.729	VIVA
point 170	354624.121	4619611.289	797.210	VIVA
point 171	354627.533	4619618.114	798.144	VIVA
point 172	354626.599	4619612.637	797.517	VIVA
point 173	354629.076	4619614.115	797.800	VIVA
point 174	354630.467	4619620.157	798.469	VIVA
point 175	354629.446	4619609.333	797.293	VIVA
point 176	354631.945	4619610.855	797.639	VIVA
point 177	354634.749	4619617.440	798.581	VIVA
point 178	354637.379	4619618.788	798.841	VIVA
point 179	354637.466	4619621.874	799.099	VIVA
point 180	354633.283	4619622.020	799.000	VIVA
point 181	354639.141	4619615.528	798.629	VIVA
point 182	354642.571	4619614.704	798.667	VIVA
point 183	354644.269	4619619.147	798.895	VIVA
point 184	354647.227	4619615.553	798.776	VIVA
point 185	354652.337	4619613.945	798.715	VIVA
point 186	354651.943	4619619.860	798.837	VIVA
point 187	354646.787	4619620.785	798.907	VIVA
point 188	354649.517	4619622.802	798.914	VIVA
point 189	354651.473	4619624.789	798.834	VIVA
point 190	354646.832	4619625.972	798.929	VIVA
point 191	354648.955	4619627.822	798.873	VIVA
point 192	354652.565	4619629.551	798.765	VIVA
point 193	354655.568	4619630.764	798.684	VIVA
point 194	354657.752	4619627.746	798.736	VIVA

point 195	354657.312	4619622.484	798.803	VIVA
point 196	354656.053	4619635.345	798.750	VIVA
point 197	354658.556	4619636.452	798.735	VIVA
point 198	354661.407	4619638.438	798.552	VIVA
point 199	354659.359	4619640.668	798.603	VIVA
point 200	354661.619	4619642.457	798.513	VIVA
point 201	354666.032	4619642.093	798.519	VIVA
point 202	354663.409	4619640.425	798.488	VIVA
point 203	354668.838	4619639.182	798.380	VIVA
point 204	354666.139	4619637.331	798.442	VIVA
point 205	354664.106	4619635.769	798.570	VIVA
point 206	354658.449	4619632.417	798.734	VIVA
point 207	354663.394	4619631.053	798.547	VIVA
point 208	354666.669	4619632.797	798.498	VIVA
point 209	354671.659	4619636.785	798.380	VIVA
point 210	354673.767	4619638.924	798.323	VIVA
point 211	354653.428	4619633.750	798.599	DUDOSA
point 212	354658.919	4619645.051	798.540	VIVA
point 213	354663.501	4619644.436	798.530	VIVA
point 214	354667.759	4619644.453	798.594	VIVA
point 215	354673.248	4619642.965	798.370	VIVA
point 216	354675.300	4619644.812	798.310	VIVA
point 217	354677.591	4619642.162	798.263	VIVA
point 218	354680.019	4619639.340	798.023	VIVA
point 219	354676.291	4619636.057	798.218	VIVA
point 220	354674.342	4619634.296	798.288	VIVA
point 221	354678.719	4619633.458	798.060	VIVA
point 222	354683.028	4619631.731	797.870	VIVA
point 223	354680.737	4619630.415	798.008	VIVA
point 224	354678.925	4619628.671	798.023	VIVA
point 225	354676.838	4619630.671	798.083	VIVA
point 226	354671.367	4619631.937	798.350	VIVA
point 227	354669.383	4619629.919	798.382	VIVA
point 228	354672.034	4619626.670	798.269	VIVA
point 229	354676.992	4619625.730	798.093	VIVA
point 230	354670.700	4619621.729	798.384	VIVA
point 231	354668.221	4619624.704	798.376	VIVA
point 232	354665.827	4619627.662	798.476	VIVA
point 233	354662.732	4619626.893	798.490	VIVA
point 234	354665.331	4619623.285	798.467	VIVA
point 235	354667.366	4619620.788	798.442	VIVA
point 236	354661.877	4619622.105	798.568	VIVA
point 237	354660.783	4619629.577	798.662	VIVA
point 238	354664.083	4619619.198	798.492	VIVA
point 239	354656.559	4619617.745	798.687	VIVA
point 240	354662.595	4619615.796	798.609	VIVA
point 241	354657.175	4619613.368	798.600	VIVA
point 242	354655.055	4619610.409	798.583	VIVA
point 243	354649.959	4619612.188	798.773	VIVA
point 244	354652.712	4619609.059	798.532	VIVA
point 245	354649.344	4619606.323	798.169	VIVA
point 246	354647.755	4619608.295	798.424	VIVA
point 247	354643.797	4619603.639	797.441	VIVA
point 248	354638.807	4619606.005	797.600	VIVA
point 249	354634.288	4619607.491	797.425	VIVA
point 250	354649.019	4619596.837	797.167	VIVA
point 251	354652.405	4619598.684	797.636	VIVA
point 252	354657.295	4619597.384	797.727	VIVA
point 253	354661.330	4619598.906	797.961	VIVA
point 254	354658.663	4619602.377	798.155	VIVA
point 255	354655.500	4619605.728	798.316	VIVA
point 256	354657.825	4619607.148	798.393	VIVA

point 257	354660.099	4619609.422	798.542	VIVA
point 258	354662.185	4619610.585	798.511	VIVA
point 259	354665.759	4619612.158	798.423	VIVA
point 260	354667.828	4619603.831	798.057	VIVA
point 261	354672.838	4619607.336	798.131	VIVA
point 262	354678.395	4619606.430	797.892	VIVA
point 263	354666.580	4619616.022	798.539	VIVA
point 264	354671.572	4619615.064	798.362	VIVA
point 265	354675.471	4619616.022	798.180	VIVA
point 266	354673.436	4619618.689	798.290	VIVA
point 267	354677.591	4619617.578	798.029	VIVA
point 268	354679.763	4619618.501	797.901	VIVA
point 269	354677.574	4619620.963	798.077	VIVA
point 270	354677.591	4619620.963	798.072	VIVA
point 271	354679.592	4619622.913	797.989	VIVA
point 272	354681.558	4619624.674	797.878	VIVA
point 273	354684.328	4619621.647	797.699	VIVA
point 274	354686.568	4619622.861	797.628	VIVA
point 275	354689.325	4619607.499	797.124	VIVA
point 276	354692.283	4619600.779	796.737	VIVA
point 277	354680.263	4619597.838	797.309	VIVA
point 278	354684.879	4619595.821	797.080	VIVA
point 279	354688.368	4619587.699	796.593	VIVA
point 280	354679.220	4619591.563	797.028	VIVA
point 281	354673.237	4619597.116	797.325	VIVA
point 282	354667.663	4619594.123	797.487	VIVA
point 283	354670.091	4619591.029	797.319	VIVA
point 284	354660.362	4619591.798	797.185	VIVA
point 285	354681.940	4619583.950	796.589	VIVA
point 286	354672.998	4619585.796	796.890	VIVA
point 287	354670.040	4619582.890	796.515	VIVA
point 288	354657.335	4619580.752	796.091	DUDOSA
point 289	354656.561	4619581.304	796.033	VIVA
point 290	354660.543	4619586.470	796.670	VIVA
point 291	354653.615	4619589.026	796.773	VIVA

5.3. SOTO DE CERRATO. AÑO 2014

Tabla 17. Coordenadas de plantas analizadas en Soto de Cerrato. Año 2014. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)	Estado
point 100	381071.365	4643644.073	728.125	VIVA
point 101	381070.506	4643640.139	728.136	VIVA
point 102	381069.588	4643636.279	728.096	VIVA
point 103	381068.726	4643632.421	728.030	VIVA
point 104	381067.702	4643628.534	727.953	VIVA
point 105	381066.835	4643624.582	727.867	VIVA
point 106	381065.916	4643620.708	727.812	VIVA
point 107	381064.984	4643616.834	727.790	VIVA
point 108	381064.130	4643613.104	727.735	VIVA
point 109	381063.146	4643608.996	727.664	VIVA
point 110	381062.292	4643605.017	727.693	VIVA
point 111	381061.451	4643601.247	727.648	VIVA
point 112	381060.519	4643597.387	727.618	VIVA
point 113	381059.665	4643593.721	727.589	VIVA
point 114	381058.759	4643589.691	727.560	VIVA
point 115	381057.879	4643585.922	727.496	VIVA
point 116	381056.803	4643582.244	727.453	VIVA
point 117	381055.924	4643578.448	727.427	VIVA
point 118	381055.005	4643574.652	727.406	VIVA
point 119	381054.189	4643570.543	727.426	VIVA

point 120	381053.323	4643566.878	727.443	VIVA
point 121	381052.495	4643562.952	727.422	VIVA
point 122	381051.458	4643558.960	727.435	VIVA
point 123	381050.565	4643555.034	727.447	VIVA
point 124	381049.646	4643551.225	727.460	VIVA
point 125	381048.818	4643547.325	727.507	VIVA
point 126	381047.808	4643543.346	727.612	VIVA
point 127	381046.849	4643539.368	727.593	VIVA
point 128	381045.982	4643535.337	727.682	VIVA
point 129	381045.024	4643531.411	727.697	VIVA
point 130	381044.144	4643527.524	727.736	VIVA
point 131	381043.172	4643523.480	727.779	VIVA
point 132	381042.305	4643519.684	727.796	VIVA
point 133	381041.334	4643515.745	727.788	VIVA
point 134	381040.467	4643511.818	727.855	VIVA
point 135	381039.547	4643507.879	727.903	VIVA
point 136	381038.615	4643503.888	727.911	VIVA
point 137	381037.683	4643499.987	727.938	VIVA
point 138	381036.720	4643496.067	727.959	VIVA
point 139	381035.719	4643492.147	727.937	VIVA
point 140	381034.779	4643488.227	727.968	VIVA
point 141	381033.787	4643484.235	728.039	VIVA
point 142	381032.889	4643480.458	728.074	VIVA
point 143	381031.995	4643476.550	728.100	VIVA
point 144	381031.028	4643472.489	728.168	VIVA
point 145	381044.577	4643651.132	727.399	VIVA
point 146	381043.556	4643647.132	727.343	VIVA
point 147	381042.771	4643643.235	727.331	VIVA
point 148	381041.794	4643639.412	727.298	VIVA
point 149	381040.936	4643635.765	727.299	VIVA
point 150	381039.959	4643631.692	727.223	VIVA
point 151	381039.099	4643627.574	727.165	VIVA
point 152	381038.138	4643623.971	727.130	VIVA
point 153	381037.279	4643620.118	727.111	VIVA
point 154	381036.390	4643616.413	727.051	VIVA
point 155	381035.634	4643612.501	727.039	VIVA
point 156	381034.716	4643608.560	726.953	VIVA
point 157	381033.798	4643604.472	726.927	VIVA
point 158	381032.939	4643600.560	726.929	VIVA
point 159	381032.080	4643596.560	726.882	VIVA
point 160	381031.236	4643592.619	726.834	VIVA
point 161	381030.480	4643588.751	726.845	VIVA
point 162	381029.562	4643584.766	726.813	VIVA
point 163	381028.820	4643580.898	726.729	VIVA
point 164	381027.917	4643576.942	726.738	VIVA
point 165	381027.220	4643573.148	726.699	VIVA
point 166	381026.273	4643569.325	726.654	viva
point 167	381025.473	4643565.471	726.655	VIVA
point 168	381024.613	4643561.427	726.679	VIVA
point 169	381023.784	4643557.500	726.661	VIVA
point 170	381023.087	4643553.618	726.675	VIVA
point 171	381022.154	4643549.706	726.712	DUDOSA
point 172	381021.369	4643546.118	726.677	VIVA
point 173	381020.627	4643542.073	726.735	VIVA
point 174	381019.709	4643538.132	726.783	VIVA
point 175	381018.924	4643534.264	726.783	VIVA
point 176	381017.991	4643530.219	726.850	VIVA
point 177	381017.191	4643526.160	726.911	VIVA
point 178	381016.317	4643522.410	726.942	VIVA
point 179	381015.576	4643518.498	726.961	VIVA
point 180	381014.717	4643514.498	726.960	VIVA
point 181	381013.887	4643510.350	727.012	VIVA

point 182	381012.924	4643506.041	727.066	VIVA
point 183	381012.050	4643501.629	727.084	VIVA
point 184	381011.102	4643497.217	727.165	VIVA
point 185	381010.124	4643492.760	727.185	VIVA
point 186	381009.161	4643488.481	727.235	VIVA
point 187	381008.273	4643484.289	727.296	VIVA
point 188	381017.086	4643658.780	726.616	VIVA
point 189	381016.350	4643654.934	726.615	VIVA
point 190	381015.470	4643651.114	726.612	VIVA
point 191	381014.612	4643647.297	726.562	VIVA
point 192	381013.641	4643643.388	726.545	VIVA
point 193	381012.752	4643639.375	726.509	VIVA
point 194	381011.813	4643635.568	726.457	VIVA
point 195	381010.985	4643631.566	726.418	VIVA
point 196	381010.138	4643627.780	726.403	VIVA
point 197	381009.229	4643623.839	726.369	VIVA
point 198	381008.351	4643620.022	726.350	VIVA
point 199	381007.410	4643615.948	726.317	VIVA
point 200	381006.532	4643612.110	726.250	VIVA
point 201	381005.623	4643608.211	726.221	VIVA
point 202	381004.672	4643604.178	726.188	VIVA
point 203	381003.835	4643600.309	726.192	VIVA
point 204	381002.947	4643596.369	726.156	VIVA
point 205	381002.078	4643592.346	726.136	VIVA
point 206	381001.189	4643588.365	726.074	VIVA
point 207	381000.250	4643584.496	726.111	VIVA
point 208	380999.357	4643580.578	726.103	VIVA
point 209	380998.330	4643576.708	726.082	VIVA
point 210	380997.529	4643572.786	726.068	VIVA
point 211	380996.636	4643568.968	726.008	VIVA
point 212	380995.610	4643564.964	725.965	VIVA
point 213	380994.840	4643561.176	725.947	VIVA
point 214	380993.998	4643557.481	725.967	VIVA
point 215	380993.115	4643553.724	725.953	VIVA
point 216	380992.263	4643549.771	726.042	VIVA
point 217	380991.319	4643545.850	726.047	VIVA
point 218	380990.467	4643542.124	726.046	VIVA
point 219	380989.563	4643538.079	726.104	VIVA
point 220	380988.711	4643534.127	726.153	VIVA
point 221	380987.767	4643530.154	726.177	VIVA
point 222	380986.782	4643526.192	726.222	VIVA
point 223	380985.888	4643522.455	726.238	VIVA
point 224	380985.088	4643518.380	726.291	VIVA
point 225	380984.102	4643514.459	726.337	VIVA
point 226	380989.526	4643662.400	725.784	VIVA
point 227	380988.634	4643658.530	725.745	VIVA
point 228	380987.705	4643654.633	725.742	DUDOSA
point 229	380986.758	4643650.773	725.778	VIVA
point 230	380985.866	4643646.776	725.819	VIVA
point 231	380984.901	4643642.888	725.836	VIVA
point 232	380984.090	4643638.909	725.874	VIVA
point 233	380983.189	4643635.094	725.874	VIVA
point 234	380982.275	4643631.030	725.815	VIVA
point 235	380981.422	4643627.213	725.790	VIVA
point 236	380980.470	4643623.430	725.787	VIVA
point 237	380979.563	4643619.482	725.765	VIVA
point 238	380978.677	4643615.578	725.740	VIVA
point 239	380977.660	4643611.477	725.691	VIVA
point 240	380976.774	4643607.574	725.679	VIVA
point 241	380975.932	4643603.681	725.656	VIVA
point 242	380975.003	4643599.678	725.611	VIVA
point 243	380974.029	4643595.687	725.538	VIVA

point 244	380973.220	4643592.231	725.512	VIVA
point 245	380972.269	4643588.196	725.374	VIVA
point 246	380971.307	4643584.249	725.204	VIVA
point 247	380970.454	4643580.443	725.077	VIVA
point 248	380969.612	4643576.649	724.938	VIVA
point 249	380968.627	4643572.581	724.873	VIVA
point 250	380967.840	4643568.710	724.907	VIVA
point 251	380966.747	4643564.850	724.942	VIVA
point 252	380965.883	4643561.033	724.987	VIVA
point 253	380964.899	4643556.856	725.033	VIVA
point 254	380963.220	4643673.339	725.224	VIVA
point 255	380962.351	4643669.692	725.193	VIVA
point 256	380961.499	4643665.958	725.236	VIVA
point 257	380960.553	4643661.854	725.200	VIVA
point 258	380959.624	4643658.060	725.244	VIVA
point 259	380958.626	4643654.000	725.190	VIVA
point 260	380957.740	4643649.982	725.221	VIVA
point 261	380956.871	4643646.317	725.215	VIVA
point 262	380955.942	4643642.317	725.223	VIVA
point 263	380955.038	4643638.489	725.241	VIVA
point 264	380954.247	4643634.729	725.258	VIVA
point 265	380953.326	4643630.866	725.267	VIVA
point 266	380952.423	4643626.918	725.267	VIVA
point 267	380951.373	4643623.055	725.271	VIVA
point 268	380950.668	4643618.968	725.275	VIVA
point 269	380949.816	4643614.977	725.252	VIVA
point 270	380948.750	4643611.166	725.200	VIVA
point 271	380947.863	4643607.243	725.084	VIVA
point 272	380946.960	4643603.285	724.943	VIVA
point 273	380946.031	4643598.683	724.698	VIVA
point 274	380945.231	4643594.674	724.636	VIVA
point 275	380944.199	4643590.570	724.532	VIVA

5.4. MATALLANA 1. AÑO 2014

Tabla 18. Coordenadas de plantas analizadas en Matallana. Año 2014. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)	Estado
point 100	345956.320	4641888.667	769.808	VIVA
point 101	345950.346	4641887.876	769.772	VIVA
point 102	345944.466	4641887.197	769.812	VIVA
point 103	345938.576	4641886.306	769.843	VIVA
point 104	345932.630	4641885.505	769.877	VIVA
point 105	345926.605	4641884.848	769.948	VIVA
point 106	345920.682	4641883.946	769.972	VIVA
point 107	345914.713	4641883.300	770.001	VIVA
point 108	345908.811	4641882.342	770.079	VIVA
point 109	345902.910	4641881.674	770.117	VIVA
point 110	345896.919	4641880.817	770.196	VIVA
point 111	345891.051	4641880.059	770.281	VIVA
point 112	345885.004	4641879.202	770.330	VIVA
point 113	345879.103	4641878.501	770.412	VIVA
point 114	345873.212	4641877.610	770.408	VIVA
point 115	345867.199	4641876.841	770.488	VIVA
point 116	345861.342	4641876.062	770.560	VIVA
point 117	345855.407	4641875.160	770.663	VIVA
point 118	345849.438	4641874.381	770.723	VIVA
point 119	345843.470	4641873.456	770.754	VIVA
point 120	345837.512	4641872.677	770.725	VIVA
point 121	345831.544	4641871.920	770.688	VIVA
point 122	345825.687	4641871.196	770.620	VIVA

point 123	345951.038	4641881.907	769.916	VIVA
point 124	345945.050	4641881.154	769.918	VIVA
point 125	345939.086	4641880.401	769.938	VIVA
point 126	345933.161	4641879.585	769.942	VIVA
point 127	345927.135	4641878.681	770.006	VIVA
point 128	345921.272	4641877.965	770.073	VIVA
point 129	345915.384	4641877.187	770.111	VIVA
point 130	345909.345	4641876.547	770.191	VIVA
point 131	345903.307	4641875.543	770.243	VIVA
point 132	345897.406	4641874.777	770.288	VIVA
point 133	345891.431	4641874.011	770.332	VIVA
point 134	345885.467	4641873.258	770.395	VIVA
point 135	345879.579	4641872.417	770.456	VIVA
point 136	345873.704	4641871.638	770.506	DUDOSA
point 137	345867.640	4641870.885	770.523	VIVA
point 138	345861.727	4641870.056	770.609	VIVA
point 139	345855.726	4641869.115	770.689	VIVA
point 140	345849.738	4641868.223	770.697	VIVA
point 141	345843.925	4641867.533	770.729	DUDOSA
point 142	345837.849	4641866.755	770.738	VIVA
point 143	345831.911	4641865.989	770.658	VIVA
point 144	345951.235	4641875.669	769.977	VIVA
point 145	345945.427	4641874.925	769.960	VIVA
point 146	345939.458	4641873.972	769.976	VIVA
point 147	345933.681	4641873.270	770.002	VIVA
point 148	345927.729	4641872.393	770.032	VIVA
point 149	345921.554	4641871.515	770.081	VIVA
point 150	345915.554	4641870.829	770.182	VIVA
point 151	345909.649	4641869.839	770.196	VIVA
point 152	345903.601	4641869.089	770.260	VIVA
point 153	345897.777	4641868.196	770.333	VIVA
point 154	345891.873	4641867.446	770.367	VIVA
point 155	345885.841	4641866.536	770.397	VIVA
point 156	345879.920	4641865.675	770.440	VIVA
point 157	345873.824	4641864.925	770.523	VIVA
point 158	345867.968	4641864.175	770.516	VIVA
point 159	345862.048	4641863.265	770.684	VIVA
point 160	345856.112	4641862.467	770.666	VIVA
point 161	345850.143	4641861.813	770.759	VIVA
point 162	345844.335	4641860.903	770.692	VIVA
point 163	345838.191	4641860.089	770.681	VIVA
point 164	345832.191	4641859.387	770.661	VIVA
point 165	345826.414	4641858.829	770.668	VIVA
point 166	345945.808	4641868.944	770.048	VIVA
point 167	345939.919	4641868.018	770.058	VIVA
point 168	345933.967	4641867.220	770.039	VIVA
point 169	345928.063	4641866.295	770.095	VIVA
point 170	345922.238	4641865.592	770.198	VIVA
point 171	345916.206	4641864.763	770.251	VIVA
point 172	345910.302	4641863.901	770.300	VIVA
point 173	345904.286	4641863.119	770.364	VIVA
point 174	345898.270	4641862.289	770.377	VIVA
point 175	345892.461	4641861.491	770.418	VIVA
point 176	345886.429	4641860.725	770.438	VIVA
point 177	345880.605	4641859.944	770.522	VIVA
point 178	345874.637	4641859.162	770.532	VIVA
point 179	345868.653	4641858.428	770.561	VIVA
point 180	345862.685	4641857.678	770.686	VIVA
point 181	345856.669	4641856.768	770.704	VIVA
point 182	345850.716	4641856.050	770.794	VIVA
point 183	345845.035	4641855.172	770.735	VIVA
point 184	345838.828	4641854.550	770.710	VIVA

point 185	345832.987	4641853.832	770.650	VIVA
point 186	345826.908	4641852.858	770.599	VIVA
point 187	345940.686	4641862.234	770.167	VIVA
point 188	345934.495	4641861.133	770.196	VIVA
point 189	345928.638	4641860.447	770.228	VIVA
point 190	345922.702	4641859.697	770.242	VIVA
point 191	345916.766	4641858.660	770.346	VIVA
point 192	345910.702	4641857.846	770.373	VIVA
point 193	345904.750	4641857.256	770.403	VIVA
point 194	345898.861	4641856.474	770.471	VIVA
point 195	345892.989	4641855.740	770.519	VIVA
point 196	345886.989	4641854.798	770.548	VIVA
point 197	345880.861	4641853.984	770.581	VIVA
point 198	345875.116	4641853.330	770.641	VIVA
point 199	345869.005	4641852.388	770.670	VIVA
point 200	345863.084	4641851.686	770.710	VIVA
point 201	345857.212	4641850.904	770.768	VIVA
point 202	345851.228	4641850.011	770.785	VIVA
point 203	345845.132	4641849.165	770.789	DUDOSA
point 204	345839.308	4641848.431	770.733	VIVA
point 205	345833.323	4641847.713	770.688	VIVA
point 206	345827.052	4641846.883	770.640	VIVA
point 207	345935.076	4641855.348	770.254	VIVA
point 208	345929.283	4641854.521	770.257	VIVA
point 209	345922.896	4641853.837	770.323	VIVA
point 210	345917.481	4641853.171	770.362	VIVA
point 211	345911.166	4641852.272	770.440	DUDOSA
point 212	345905.103	4641851.552	770.428	VIVA
point 213	345899.418	4641850.850	770.455	VIVA
point 214	345893.175	4641849.789	770.511	VIVA
point 215	345887.454	4641849.033	770.522	VIVA
point 216	345881.607	4641848.260	770.535	VIVA
point 217	345875.814	4641847.486	770.670	VIVA
point 218	345869.661	4641846.623	770.702	DUDOSA
point 219	345863.670	4641845.885	770.741	VIVA
point 220	345857.715	4641845.093	770.757	VIVA
point 221	345851.580	4641844.302	770.805	VIVA
point 222	345845.769	4641843.348	770.788	VIVA
point 223	345839.868	4641842.773	770.767	VIVA
point 224	345833.733	4641842.017	770.742	VIVA
point 225	345827.760	4641841.171	770.689	VIVA
point 226	345929.697	4641848.548	770.313	VIVA
point 227	345923.760	4641847.684	770.342	VIVA
point 228	345917.571	4641846.820	770.338	VIVA
point 229	345911.508	4641846.245	770.407	VIVA
point 230	345905.823	4641845.417	770.436	VIVA
point 231	345899.562	4641844.554	770.480	VIVA
point 232	345893.679	4641843.852	770.565	VIVA
point 233	345887.922	4641843.114	770.563	VIVA
point 234	345881.769	4641842.215	770.595	VIVA
point 235	345875.616	4641841.441	770.704	VIVA
point 236	345869.733	4641840.668	770.728	VIVA
point 237	345863.598	4641839.840	770.757	VIVA
point 238	345857.949	4641839.102	770.752	VIVA
point 239	345851.886	4641838.311	770.800	VIVA
point 240	345845.949	4641837.609	770.777	VIVA
point 241	345839.994	4641836.692	770.766	VIVA
point 242	345834.057	4641835.954	770.797	VIVA
point 243	345828.048	4641835.198	770.699	VIVA
point 244	345924.258	4641841.795	770.378	VIVA
point 245	345917.871	4641840.985	770.408	VIVA
point 246	345912.330	4641840.014	770.480	VIVA

point 247	345906.285	4641839.330	770.465	VIVA
point 248	345900.114	4641838.485	770.502	VIVA
point 249	345894.321	4641837.585	770.570	VIVA
point 250	345888.438	4641836.704	770.587	VIVA
point 251	345882.303	4641835.966	770.668	VIVA
point 252	345876.438	4641835.246	770.743	VIVA
point 253	345870.429	4641834.329	770.739	VIVA
point 254	345864.312	4641833.663	770.808	VIVA
point 255	345858.519	4641832.818	770.816	VIVA
point 256	345852.654	4641832.062	770.769	VIVA
point 257	345846.627	4641831.468	770.798	VIVA
point 258	345840.420	4641830.497	770.766	VIVA
point 259	345834.897	4641829.957	770.746	VIVA
point 260	345828.528	4641829.165	770.753	VIVA
point 261	345918.708	4641834.676	770.468	VIVA
point 262	345912.627	4641834.010	770.461	VIVA
point 263	345906.636	4641833.183	770.494	VIVA
point 264	345900.771	4641832.463	770.561	VIVA
point 265	345894.600	4641831.618	770.595	VIVA
point 266	345888.825	4641830.880	770.653	VIVA
point 267	345882.690	4641830.106	770.703	VIVA
point 268	345876.753	4641829.387	770.781	VIVA
point 269	345870.582	4641828.613	770.793	VIVA
point 270	345864.969	4641827.930	770.830	VIVA
point 271	345858.870	4641827.066	770.838	VIVA
point 272	345853.185	4641826.220	770.816	VIVA
point 273	345846.852	4641825.429	770.839	VIVA
point 274	345840.825	4641824.817	770.834	VIVA
point 275	345834.798	4641824.133	770.805	DUDOSA
point 276	345828.951	4641823.144	770.804	VIVA
point 277	345913.516	4641827.951	770.514	VIVA
point 278	345907.219	4641827.376	770.575	VIVA
point 279	345901.264	4641826.530	770.610	VIVA
point 280	345895.219	4641825.757	770.633	VIVA
point 281	345889.498	4641825.037	770.685	VIVA
point 282	345883.435	4641824.245	770.750	VIVA
point 283	345877.534	4641823.328	770.804	VIVA
point 284	345871.435	4641822.662	770.834	VIVA
point 285	345865.840	4641821.888	770.870	VIVA
point 286	345859.525	4641821.115	770.857	VIVA
point 287	345853.318	4641820.161	770.839	VIVA
point 288	345847.489	4641819.604	770.849	VIVA
point 289	345841.408	4641818.812	770.854	VIVA
point 290	345835.489	4641818.002	770.806	VIVA
point 291	345829.732	4641817.283	770.820	VIVA
point 292	345907.576	4641821.144	770.624	VIVA
point 293	345901.333	4641820.280	770.648	VIVA
point 294	345895.306	4641819.452	770.677	VIVA
point 295	345889.459	4641818.769	770.735	VIVA
point 296	345883.252	4641817.995	770.789	VIVA
point 297	345877.423	4641817.401	770.835	VIVA
point 298	345871.432	4641816.592	770.901	VIVA
point 299	345865.405	4641815.890	770.850	VIVA
point 300	345859.522	4641815.045	770.893	VIVA
point 301	345853.459	4641814.343	770.861	VIVA
point 302	345847.594	4641813.623	770.859	VIVA
point 303	345841.531	4641812.850	770.857	VIVA
point 304	345835.701	4641812.166	770.846	VIVA
point 305	345829.566	4641811.338	770.824	VIVA
point 306	345908.099	4641814.847	770.678	VIVA
point 307	345902.019	4641814.241	770.706	VIVA
point 308	345896.194	4641813.651	770.724	VIVA

point 309	345890.003	4641812.869	770.802	VIVA
point 310	345884.051	4641812.023	770.850	VIVA
point 311	345878.067	4641811.273	770.891	VIVA
point 312	345872.306	4641810.651	770.882	VIVA
point 313	345866.019	4641809.773	770.924	VIVA
point 314	345860.162	4641809.103	770.915	VIVA
point 315	345854.210	4641808.289	770.906	VIVA
point 316	345848.242	4641807.603	770.853	VIVA
point 317	345842.290	4641806.900	770.874	VIVA
point 318	345836.465	4641806.055	770.852	VIVA
point 319	345830.194	4641805.416	770.867	DUDOSA
point 320	345902.228	4641807.956	770.740	VIVA
point 321	345896.367	4641807.229	770.746	VIVA
point 322	345890.280	4641806.581	770.851	VIVA
point 323	345884.732	4641805.987	770.880	VIVA
point 324	345878.532	4641805.123	770.872	VIVA
point 325	345872.588	4641804.515	770.875	VIVA
point 326	345866.595	4641803.762	770.926	VIVA
point 327	345860.664	4641802.955	770.899	VIVA
point 328	345854.578	4641802.233	770.876	VIVA
point 329	345848.860	4641801.497	770.877	VIVA
point 330	345842.915	4641800.804	770.894	VIVA
point 331	345836.786	4641800.096	770.861	VIVA
point 332	345830.516	4641799.374	770.836	VIVA

5.5. SAN ISIDRO. AÑO 2015

Tabla 19. Coordenadas de plantas analizadas en San Isidro. Año 2015. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)	Estado
point 100	305416.909	4768220.092	1701.147	VIVA
point 101	305412.861	4768213.518	1701.464	DUDOSA
point 102	305412.188	4768209.663	1701.231	VIVA
point 103	305406.749	4768218.034	1703.210	VIVA
point 104	305408.093	4768207.48	1702.086	VIVA
point 105	305401.985	4768217.647	1704.167	VIVA
point 106	305403.889	4768205.810	1703.053	VIVA
point 107	305397.348	4768216.814	1705.060	VIVA
point 108	305398.600	4768211.373	1704.685	VIVA
point 109	305399.846	4768206.932	1704.061	VIVA
point 110	305401.674	4768201.507	1703.106	VIVA
point 111	305392.545	4768216.685	1706.057	VIVA
point 112	305393.682	4768212.004	1705.680	VIVA
point 113	305395.422	4768204.141	1704.151	VIVA
point 114	305398.887	4768199.013	1702.862	VIVA
point 115	305388.037	4768215.35	1707.065	VIVA
point 116	305389.81	4768209.914	1706.453	VIVA
point 117	305392.534	4768206.681	1705.528	VIVA
point 118	305394.490	4768198.173	1703.451	VIVA
point 119	305382.817	4768213.980	1708.049	VIVA
point 120	305384.854	4768208.657	1707.385	VIVA
point 121	305388.081	4768204.066	1706.095	VIVA
point 122	305391.211	4768201.779	1704.802	VIVA
point 123	305378.105	4768213.357	1709.010	VIVA
point 124	305380.779	4768209.407	1708.239	VIVA
point 125	305374.337	4768212.198	1709.490	VIVA
point 126	305376.514	4768204.274	1708.440	VIVA
point 127	305380.209	4768200.644	1707.600	VIVA
point 128	305382.714	4768197.253	1706.864	VIVA
point 129	305378.799	4768195.642	1707.289	VIVA
point 130	305387.852	4768196.144	1705.223	VIVA

point 131	305383.880	4768192.337	1705.465	VIVA
point 132	305379.063	4768190.761	1706.183	VIVA
point 133	305371.733	4768207.512	1709.813	VIVA
point 134	305371.341	4768202.782	1709.354	VIVA
point 135	305374.339	4768198.531	1708.489	VIVA
point 136	305367.867	4768206.067	1709.980	VIVA
point 137	305373.015	4768193.563	1707.850	VIVA
point 138	305374.124	4768188.875	1707.266	VIVA
point 139	305363.406	4768204.345	1710.346	VIVA
point 140	305366.601	4768198.755	1709.599	VIVA
point 141	305369.760	4768187.719	1708.060	VIVA
point 142	305365.481	4768184.536	1708.285	VIVA
point 143	305363.377	4768189.468	1708.948	VIVA
point 144	305362.521	4768194.965	1709.300	VIVA
point 145	305358.853	4768192.670	1709.655	VIVA
point 146	305359.131	4768198.722	1710.314	VIVA
point 147	305355.804	4768202.854	1711.368	VIVA
point 148	305350.797	4768205.077	1712.698	VIVA
point 149	305352.885	4768200.597	1711.436	VIVA
point 150	305352.632	4768192.988	1710.489	VIVA
point 151	305357.317	4768188.972	1709.343	VIVA
point 152	305355.770	4768181.542	1709.211	VIVA
point 153	305356.904	4768174.311	1708.447	VIVA
point 154	305352.935	4768169.697	1709.381	VIVA
point 155	305352.815	4768175.073	1709.265	VIVA
point 156	305349.474	4768171.394	1710.508	VIVA
point 157	305345.297	4768173.743	1711.217	VIVA
point 158	305348.823	4768177.900	1710.564	VIVA
point 159	305350.784	4768181.688	1710.09	VIVA
point 160	305353.185	4768184.922	1709.652	VIVA
point 161	305347.149	4768187.212	1710.883	VIVA
point 162	305340.970	4768182.054	1712.670	VIVA
point 163	305342.790	4768188.622	1712.088	VIVA
point 164	305347.603	4768194.923	1711.582	VIVA
point 165	305337.983	4768190.737	1713.254	VIVA
point 166	305335.915	4768198.031	1713.609	VIVA
point 167	305341.801	4768197.431	1712.815	VIVA
point 168	305339.184	4768201.236	1713.900	VIVA
point 169	305345.935	4768202.570	1712.670	VIVA
point 170	305345.123	4768207.114	1714.073	VIVA
point 171	305335.724	4768203.819	1714.718	VIVA
point 172	305329.310	4768193.255	1715.191	VIVA
point 173	305323.012	4768194.731	1716.568	VIVA
point 174	305332.164	4768199.826	1714.668	DUDOSA
point 175	305345.540	4768168.261	1711.289	DUDOSA
point 176	305342.053	4768170.055	1711.797	VIVA
point 177	305339.938	4768173.275	1712.161	VIVA
point 178	305340.878	4768176.849	1712.173	VIVA
point 179	305336.002	4768184.313	1713.866	VIVA
point 180	305335.922	4768178.988	1713.632	VIVA
point 181	305335.037	4768174.505	1712.928	VIVA
point 182	305335.035	4768167.994	1712.609	VIVA
point 183	305339.021	4768165.673	1711.903	VIVA
point 184	305331.730	4768164.000	1713.174	VIVA
point 185	305328.290	4768166.940	1713.823	VIVA
point 186	305331.183	4768176.461	1714.524	VIVA
point 187	305327.709	4768178.818	1715.675	VIVA
point 188	305326.302	4768172.151	1715.122	VIVA
point 189	305324.304	4768168.722	1714.958	VIVA
point 190	305323.043	4768164.992	1714.787	VIVA
point 191	305318.899	4768166.730	1715.700	VIVA
point 192	305320.178	4768170.854	1716.204	VIVA

point 193	305321.887	4768174.843	1716.351	VIVA
point 194	305322.790	4768180.03	1716.727	VIVA
point 195	305327.348	4768184.157	1716.304	VIVA
point 196	305318.278	4768185.795	1718.113	VIVA
point 197	305313.494	4768187.73	1719.067	VIVA
point 198	305318.867	4768180.716	1717.668	VIVA
point 199	305314.653	4768182.302	1718.773	VIVA
point 200	305316.454	4768175.600	1717.539	VIVA
point 201	305312.316	4768178.041	1718.700	VIVA
point 202	305314.963	4768171.536	1717.386	VIVA
point 203	305314.020	4768168.199	1716.894	VIVA
point 204	305308.917	4768163.998	1716.696	VIVA
point 205	305309.835	4768168.714	1717.713	VIVA
point 206	305308.922	4768179.780	1719.514	VIVA
point 207	305309.316	4768183.813	1719.867	VIVA
point 208	305308.585	4768188.846	1719.977	VIVA
point 209	305307.995	4768193.669	1719.939	VIVA
point 210	305303.884	4768189.210	1720.821	VIVA
point 211	305304.753	4768183.829	1720.603	VIVA
point 212	305305.763	4768174.503	1719.232	VIVA
point 213	305305.371	4768170.283	1718.492	VIVA
point 214	305304.178	4768165.472	1717.762	VIVA
point 215	305296.66	4768163.152	1718.363	VIVA
point 216	305299.265	4768166.965	1718.615	VIVA
point 217	305301.111	4768171.146	1719.298	DUDOSA
point 218	305294.666	4768169.373	1719.616	VIVA
point 219	305297.063	4768173.463	1720.213	DUDOSA
point 220	305290.908	4768172.555	1720.620	VIVA
point 221	305294.029	4768175.449	1720.992	VIVA
point 222	305300.987	4768177.206	1720.201	VIVA
point 223	305297.214	4768179.425	1721.183	VIVA
point 224	305300.327	4768183.526	1721.362	VIVA
point 225	305295.881	4768183.219	1721.985	VIVA
point 226	305298.559	4768188.991	1721.875	VIVA
point 227	305293.982	4768193.369	1722.556	VIVA
point 228	305293.064	4768189.065	1722.759	VIVA
point 229	305287.844	4768192.360	1723.530	DUDOSA
point 230	305288.400	4768187.359	1723.371	VIVA
point 231	305291.472	4768184.450	1722.644	VIVA
point 232	305290.631	4768178.952	1721.882	VIVA

5.6. RIOFRÍO DE ALISTE. AÑO 2015

Tabla 20. Coordenadas de plantas analizadas en Riofrío de Aliste. Año 2015. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Estado
point 101	237779.757	4632449.924	VIVA
point 102	237779.312	4632448.104	DUDOSA
point 103	237779.545	4632446.347	VIVA
point 104	237779.566	4632444.717	VIVA
point 105	237780.773	4632443.151	DUDOSA
point 106	237782.021	4632441.839	VIVA
point 107	237783.884	4632440.209	VIVA
point 108	237785.07	4632438.939	VIVA
point 109	237786.149	4632437.309	VIVA
point 110	237787.44	4632436.356	VIVA
point 111	237788.604	4632434.769	VIVA
point 112	237790.128	4632433.922	VIVA
point 113	237790.869	4632432.06	VIVA
point 114	237792.711	4632430.938	VIVA
point 115	237794.023	4632429.181	VIVA

point 116	237795.568	4632428.377	VIVA
point 117	237797.177	4632427.064	VIVA
point 118	237798.151	4632425.773	VIVA
point 119	237799.357	4632424.63	VIVA
point 120	237800.923	4632423.593	VIVA
point 121	237801.961	4632422.513	VIVA
point 122	237803.506	4632421.286	VIVA
point 123	237804.035	4632419.825	VIVA
point 124	237805.813	4632419.211	DUDOSA
point 125	237807.57	4632418.365	DUDOSA
point 126	237809.094	4632417.624	VIVA
point 127	237810.046	4632415.698	DUDOSA
point 128	237811.401	4632414.597	VIVA
point 129	237813.221	4632412.544	VIVA
point 130	237813.391	4632411.21	VIVA
point 131	237815.359	4632409.771	VIVA
point 132	237816.671	4632408.205	VIVA
point 133	237818.217	4632407.358	VIVA
point 134	237819.719	4632406.66	VIVA
point 135	237821.667	4632405.686	VIVA
point 136	237823.275	4632404.501	VIVA
point 137	237824.99	4632403.167	VIVA
point 138	237826.345	4632402.426	DUDOSA
point 139	237827.297	4632401.199	VIVA
point 140	237828.927	4632400.161	VIVA
point 141	237829.795	4632398.87	VIVA
point 142	237830.832	4632397.833	VIVA
point 143	237832.123	4632396.88	VIVA
point 144	237833.584	4632395.843	VIVA
point 145	237834.684	4632394.616	VIVA
point 146	237835.933	4632393.536	VIVA
point 147	237837.309	4632392.203	VIVA
point 148	237838.558	4632391.208	VIVA
point 149	237839.785	4632390.086	VIVA
point 150	237841.267	4632388.816	VIVA
point 151	237842.558	4632387.271	DUDOSA
point 152	237843.998	4632386.276	VIVA
point 153	237845.437	4632384.710	VIVA
point 154	237846.453	4632383.567	VIVA
point 155	237847.427	4632382.847	VIVA
point 156	237848.929	4632381.429	VIVA
point 157	237850.263	4632380.370	VIVA
point 158	237851.533	4632379.058	DUDOSA
point 159	237853.057	4632377.555	VIVA
point 160	237854.454	4632375.883	VIVA
point 161	237855.745	4632374.232	VIVA
point 162	237856.994	4632372.412	VIVA
point 163	237858.031	4632370.909	VIVA
point 164	237858.666	4632369.575	DUDOSA
point 165	237780.080	4632435.587	DUDOSA
point 166	237781.414	4632434.931	VIVA
point 167	237782.789	4632433.428	VIVA
point 168	237783.869	4632431.946	VIVA
point 169	237784.864	4632430.698	VIVA
point 170	237785.605	4632429.470	VIVA
point 171	237786.684	4632428.348	VIVA
point 172	237787.742	4632427.290	VIVA
point 173	237788.737	4632425.999	VIVA
point 174	237790.071	4632424.940	VIVA
point 175	237791.404	4632423.945	DUDOSA
point 176	237792.547	4632422.908	VIVA
point 177	237793.373	4632421.554	VIVA

point 178	237794.325	4632420.347	VIVA
point 179	237795.087	4632419.204	VIVA
point 180	237796.442	4632417.744	VIVA
point 181	237797.394	4632416.389	VIVA
point 182	237798.241	4632415.267	VIVA
point 183	237799.130	4632414.145	VIVA
point 184	237800.040	4632413.277	VIVA
point 185	237801.077	4632412.156	VIVA
point 186	237802.178	4632411.055	VIVA
point 187	237803.321	4632409.997	VIVA
point 188	237804.358	4632408.769	VIVA
point 189	237805.544	4632407.457	VIVA
point 190	237806.517	4632406.398	VIVA
point 191	237807.385	4632405.065	VIVA
point 192	237808.655	4632403.985	VIVA
point 193	237810.031	4632402.948	VIVA
point 194	237811.132	4632401.974	VIVA
point 195	237812.232	4632401.064	VIVA
point 196	237814.666	4632399.583	VIVA
point 197	237815.915	4632398.207	VIVA
point 198	237817.164	4632397.000	VIVA
point 199	237818.434	4632395.455	VIVA
point 200	237819.514	4632394.376	VIVA
point 201	237821.080	4632393.254	VIVA
point 202	237822.286	4632391.920	DUDOSA
point 203	237823.535	4632390.714	VIVA
point 204	237824.636	4632389.380	VIVA
point 205	237825.779	4632388.131	VIVA
point 206	237826.901	4632387.094	VIVA
point 207	237828.319	4632385.549	VIVA
point 208	237829.335	4632384.342	VIVA
point 209	237830.605	4632383.390	VIVA
point 210	237831.621	4632381.951	VIVA
point 211	237832.637	4632381.019	VIVA
point 212	237833.992	4632380.363	VIVA
point 213	237835.579	4632379.326	VIVA
point 214	237836.786	4632378.268	VIVA
point 215	237838.161	4632377.125	VIVA
point 216	237839.241	4632375.960	VIVA
point 217	237840.405	4632374.648	VIVA
point 218	237842.056	4632372.743	VIVA
point 219	237843.157	4632371.410	VIVA
point 220	237844.236	4632370.076	VIVA
point 221	237845.422	4632369.018	VIVA
point 222	237846.882	4632367.367	VIVA
point 223	237847.390	4632365.504	VIVA
point 224	237777.794	4632427.411	VIVA
point 225	237779.424	4632427.348	VIVA
point 226	237780.292	4632426.184	DUDOSA
point 227	237781.646	4632425.972	VIVA
point 228	237782.557	4632424.998	VIVA
point 229	237782.959	4632423.623	VIVA
point 230	237783.827	4632422.818	VIVA
point 231	237785.266	4632422.416	VIVA
point 232	237785.986	4632421.400	VIVA
point 233	237786.811	4632420.363	VIVA
point 234	237787.658	4632419.537	VIVA
point 235	237788.335	4632418.416	VIVA
point 236	237788.822	4632417.040	VIVA
point 237	237790.134	4632416.616	VIVA
point 238	237790.896	4632415.558	VIVA
point 239	237791.658	4632414.627	VIVA

point 240	237792.611	4632413.060	VIVA
point 241	237793.902	4632411.642	VIVA
point 242	237794.622	4632410.520	VIVA
point 243	237795.574	4632409.462	VIVA
point 244	237796.442	4632408.404	VIVA
point 245	237797.267	4632407.240	VIVA
point 246	237798.283	4632406.181	VIVA
point 247	237799.257	4632405.017	VIVA
point 248	237800.273	4632403.747	VIVA
point 249	237801.353	4632402.773	VIVA
point 250	237802.305	4632401.609	VIVA
point 251	237803.046	4632400.403	VIVA
point 252	237803.914	4632399.408	VIVA
point 253	237804.930	4632398.286	VIVA
point 254	237805.755	4632397.291	VIVA
point 255	237806.729	4632396.296	VIVA
point 256	237807.724	4632395.577	VIVA
point 257	237807.851	4632393.905	VIVA
point 258	237809.332	4632393.143	VIVA
point 259	237810.200	4632392.042	VIVA
point 260	237810.983	4632390.920	VIVA
point 261	237811.788	4632389.946	VIVA
point 262	237812.740	4632388.973	VIVA
point 263	237813.629	4632388.020	VIVA
point 264	237814.497	4632387.089	VIVA
point 265	237815.619	4632385.967	VIVA
point 266	237816.635	4632384.739	VIVA
point 267	237817.524	4632383.829	VIVA
point 268	237818.434	4632382.856	VIVA
point 269	237818.773	4632381.670	VIVA
point 270	237820.170	4632380.781	VIVA
point 271	237821.122	4632379.511	VIVA
point 272	237821.990	4632378.538	VIVA
point 273	237822.964	4632377.416	VIVA
point 274	237823.747	4632376.400	VIVA
point 275	237824.594	4632375.363	VIVA
point 276	237825.546	4632374.410	VIVA
point 277	237826.456	4632373.309	VIVA
point 278	237827.324	4632372.357	VIVA
point 279	237828.319	4632371.235	VIVA
point 280	237829.377	4632370.028	VIVA
point 281	237830.309	4632368.653	VIVA
point 282	237831.134	4632367.594	VIVA
point 283	237831.938	4632366.494	VIVA
point 284	237832.679	4632365.732	VIVA
point 285	237833.843	4632365.075	VIVA
point 286	237781.957	4632414.376	VIVA
point 287	237783.481	4632412.302	VIVA
point 288	237784.962	4632410.524	VIVA
point 289	237786.888	4632408.259	VIVA
point 290	237788.455	4632406.354	DUDOSA
point 291	237790.021	4632404.110	VIVA
point 292	237791.609	4632402.248	VIVA
point 293	237793.450	4632399.962	VIVA
point 294	237796.054	4632397.189	VIVA
point 295	237798.086	4632395.136	VIVA
point 296	237799.673	4632393.167	VIVA
point 297	237801.430	4632390.923	VIVA
point 298	237803.399	4632388.934	DUDOSA
point 299	237805.092	4632386.605	VIVA
point 300	237806.849	4632385.039	VIVA
point 301	237808.775	4632382.753	VIVA

point 302	237811.886	4632378.880	VIVA
point 303	237814.850	4632375.408	VIVA
point 304	237817.919	4632371.916	VIVA
point 305	237821.200	4632368.423	VIVA
point 306	237824.163	4632364.402	VIVA
point 307	237827.380	4632360.126	VIVA

5.7. PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015

Tabla 21. Coordenadas de plantas analizadas en Pedrajas de San Esteban. Año 2015. (ETRS89, proyección UTM huso 30N)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Estado
point 101	369625.482	4578061.032	VIVA
point 102	369623.471	4578057.725	VIVA
point 103	369617.941	4578058.915	VIVA
point 104	369622.422	4578051.529	VIVA
point 105	369619.974	4578046.303	VIVA
point 106	369616.998	4578052.984	VIVA
point 107	369612.963	4578046.833	VIVA
point 108	369607.010	4578054.175	VIVA
point 109	369605.025	4578056.291	VIVA
point 110	369589.633	4578047.158	VIVA
point 111	369592.808	4578044.777	VIVA
point 112	369599.224	4578045.769	DUDOSA
point 113	369599.621	4578041.006	VIVA
point 114	369603.590	4578038.228	VIVA
point 115	369606.963	4578035.119	VIVA
point 116	369610.403	4578032.011	VIVA
point 117	369620.721	4578032.540	VIVA
point 118	369606.632	4578025.528	VIVA
point 119	369601.605	4578025.859	VIVA
point 120	369591.286	4578028.836	VIVA
point 121	369595.718	4578036.575	VIVA
point 122	369591.816	4578040.279	DUDOSA
point 123	369589.765	4578035.119	VIVA
point 124	369584.738	4578038.757	VIVA
point 125	369580.571	4578042.131	VIVA
point 126	369577.396	4578045.504	VIVA
point 127	369569.657	4578044.446	VIVA
point 128	369573.890	4578041.999	VIVA
point 129	369579.182	4578036.112	DUDOSA
point 130	369562.337	4578041.704	VIVA
point 131	369572.986	4578036.876	VIVA
point 132	369567.694	4578037.273	VIVA
point 133	369553.341	4578039.323	VIVA
point 134	369554.399	4578032.642	VIVA
point 135	369561.344	4578033.502	VIVA
point 136	369553.275	4578030.327	DUDOSA
point 137	369541.765	4578026.226	DUDOSA
point 138	369537.532	4578017.627	VIVA
point 139	369560.220	4578025.234	VIVA
point 140	369570.869	4578027.615	VIVA
point 141	369567.364	4578022.125	VIVA
point 142	369550.272	4578023.808	DUDOSA
point 143	369543.326	4578018.570	VIVA
point 144	369550.589	4578017.697	VIVA
point 145	369583.231	4578028.873	VIVA
point 146	369584.263	4578029.985	VIVA
point 147	369572.992	4578014.665	VIVA

point 148	369579.739	4578013.197	VIVA
point 149	369590.415	4578012.443	VIVA
point 150	369601.974	4578017.628	VIVA
point 151	369623.270	4578015.216	VIVA
point 152	369612.639	4578006.687	VIVA
point 153	369616.350	4577999.018	VIVA
point 154	369616.284	4577988.633	VIVA
point 155	369613.885	4577976.297	VIVA
point 156	369601.502	4577980.901	VIVA
point 157	369593.723	4577988.124	VIVA
point 158	369590.548	4577995.427	VIVA
point 159	369584.039	4577999.157	VIVA
point 160	369598.136	4578009.704	VIVA
point 161	369590.569	4578003.777	VIVA
point 162	369564.204	4578016.411	VIVA
point 163	369580.343	4578006.489	VIVA
point 164	369582.526	4577988.100	VIVA
point 165	369563.278	4577995.707	VIVA
point 166	369556.861	4577993.127	VIVA
point 167	369559.190	4578004.425	VIVA
point 168	369550.935	4578004.372	VIVA
point 169	369541.476	4578010.722	VIVA
point 170	369535.787	4578009.002	VIVA
point 171	369545.841	4578000.403	VIVA
point 172	369545.841	4577994.252	VIVA
point 173	369548.090	4577986.182	VIVA
point 174	369535.619	4578000.860	VIVA
point 175	369526.371	4577990.859	DUDOSA
point 176	369531.967	4577990.819	DUDOSA
point 177	369537.960	4577988.755	VIVA
point 178	369541.572	4577985.659	VIVA
point 179	369523.752	4577984.337	VIVA
point 180	369532.801	4577983.940	VIVA
point 181	369537.444	4577982.432	VIVA
point 182	369517.645	4577976.505	VIVA
point 183	369524.689	4577976.671	VIVA
point 184	369530.874	4577975.017	VIVA
point 185	369537.885	4577975.645	VIVA
point 186	369513.388	4577970.785	VIVA
point 187	369521.061	4577970.156	VIVA
point 188	369511.007	4577962.219	VIVA
point 189	369506.369	4577959.827	VIVA
point 190	369501.924	4577951.572	VIVA
point 191	369513.248	4577956.228	VIVA
point 192	369495.852	4577948.053	VIVA
point 193	369507.123	4577946.386	VIVA
point 194	369489.144	4577941.544	DUDOSA
point 195	369494.621	4577937.893	VIVA
point 196	369508.353	4577939.361	VIVA
point 197	369498.908	4577934.559	VIVA
point 198	369491.248	4577934.281	DUDOSA
point 199	369484.104	4577934.400	VIVA
point 200	369482.914	4577931.939	DUDOSA
point 201	369492.797	4577928.394	VIVA
point 202	369499.623	4577926.277	VIVA
point 203	369479.039	4577929.558	DUDOSA
point 204	369492.532	4577922.467	VIVA
point 205	369476.763	4577925.642	VIVA
point 206	369470.043	4577913.895	VIVA

5.8. SAN MATEO. AÑO 2015

Tabla 22. Coordenadas de plantas analizadas en San Mateo. Año 2015. (Sistema ETRS89, proyección UTM huso 30 Norte)

Código	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)	Estado
point 100	693405.640	4641061.483	416.157	VIVA
point 101	693401.181	4641062.360	415.979	VIVA
point 102	693396.611	4641063.370	415.698	VIVA
point 103	693392.114	4641064.562	415.542	VIVA
point 104	693388.060	4641065.540	415.348	VIVA
point 105	693383.791	4641066.279	415.166	VIVA
point 106	693379.237	4641067.326	415.029	VIVA
point 107	693374.787	4641068.349	414.724	VIVA
point 108	693370.186	4641069.083	414.454	VIVA
point 109	693366.461	4641069.881	414.209	VIVA
point 110	693361.974	4641070.992	414.022	VIVA
point 111	693357.663	4641071.632	413.840	VIVA
point 112	693352.975	4641072.773	413.606	VIVA
point 113	693348.257	4641073.763	413.361	VIVA
point 114	693344.346	4641074.546	413.278	VIVA
point 115	693340.126	4641075.353	413.084	VIVA
point 116	693336.372	4641076.213	413.056	MARRA
point 117	693332.333	4641076.965	412.837	VIVA
point 118	693327.527	4641077.775	412.755	VIVA
point 119	693323.506	4641078.744	412.629	VIVA
point 120	693319.764	4641079.374	412.425	VIVA
point 121	693315.818	4641080.357	412.312	VIVA
point 122	693311.277	4641081.257	412.072	VIVA
point 123	693307.110	4641082.292	411.804	VIVA
point 124	693303.045	4641083.200	411.623	VIVA
point 125	693298.989	4641083.792	411.357	VIVA
point 126	693394.247	4641023.067	415.468	VIVA
point 127	693390.370	4641024.003	415.226	MARRA
point 128	693385.961	4641024.853	414.958	VIVA
point 129	693381.608	4641025.684	414.835	VIVA
point 130	693377.201	4641026.520	414.761	VIVA
point 131	693372.696	4641027.807	414.609	VIVA
point 132	693368.373	4641028.542	414.571	VIVA
point 133	693364.120	4641029.404	414.493	VIVA
point 134	693360.387	4641030.124	414.347	VIVA
point 135	693356.252	4641031.147	414.151	VIVA
point 136	693351.248	4641032.074	414.127	VIVA
point 137	693346.933	4641032.973	413.960	VIVA
point 138	693342.831	4641033.847	413.844	VIVA
point 139	693337.852	4641034.992	413.665	VIVA
point 140	693333.666	4641035.687	413.511	VIVA

point 141	693329.500	4641036.635	413.318	VIVA
point 142	693324.774	4641037.537	413.068	VIVA
point 143	693320.754	4641038.272	412.799	VIVA
point 144	693316.473	4641039.255	412.647	VIVA
point 145	693312.654	4641040.191	412.270	VIVA
point 146	693308.545	4641040.838	412.090	VIVA
point 147	693304.599	4641041.858	411.800	VIVA
point 148	693300.791	4641042.636	411.502	VIVA
point 149	693296.014	4641043.712	411.096	VIVA
point 150	693292.391	4641044.383	410.708	VIVA
point 151	693288.358	4641045.161	410.404	VIVA
point 152	693284.392	4641046.134	410.043	VIVA
point 153	693380.352	4640981.127	413.718	VIVA
point 154	693375.897	4640981.826	413.449	VIVA
point 155	693371.604	4640982.950	413.140	VIVA
point 156	693367.159	4640983.483	412.919	VIVA
point 157	693363.253	4640984.344	412.850	VIVA
point 158	693359.506	4640985.291	412.609	VIVA
point 159	693354.688	4640985.826	412.430	VIVA
point 160	693350.855	4640986.520	412.281	VIVA
point 161	693346.787	4640987.883	412.233	VIVA
point 162	693342.873	4640988.508	412.270	VIVA
point 163	693337.388	4640989.79	411.737	VIVA
point 164	693333.149	4640990.334	411.518	VIVA
point 165	693328.818	4640991.261	411.271	VIVA
point 166	693325.054	4640991.701	411.151	VIVA
point 167	693320.210	4640992.836	410.868	VIVA
point 168	693315.671	4640993.868	410.686	MARRA
point 169	693311.082	4640994.632	410.358	VIVA
point 170	693306.603	4640995.420	410.167	VIVA
point 171	693302.191	4640996.414	409.897	VIVA
point 172	693298.730	4640997.043	409.830	VIVA
point 173	693294.108	4640997.970	409.570	VIVA
point 174	693290.402	4640998.906	409.535	VIVA
point 175	693286.237	4640999.678	409.267	VIVA
point 176	693334.853	4641009.470	412.636	VIVA
point 177	693331.028	4641010.285	412.467	MARRA
point 178	693326.365	4641011.247	412.334	VIVA
point 179	693321.849	4641012.306	412.116	VIVA
point 180	693317.665	4641013.087	411.858	VIVA
point 181	693313.303	4641013.991	411.56	VIVA
point 182	693309.113	4641014.765	411.322	VIVA
point 183	693305.368	4641015.722	411.108	VIVA
point 184	693301.025	4641016.751	410.906	VIVA
point 185	693297.205	4641017.376	410.422	VIVA
point 186	693292.792	4641018.484	410.139	VIVA

point 187	693288.469	4641019.287	409.818	VIVA
point 188	693284.709	4641020.186	409.514	VIVA
point 189	693281.442	4641020.972	409.285	VIVA
point 190	693277.334	4641021.808	409.079	VIVA
point 191	693272.486	4641022.760	408.889	VIVA
point 192	693268.352	4641023.425	408.750	VIVA
point 193	693348.418	4641043.024	414.006	VIVA
point 194	693344.048	4641044.078	413.664	MARRA
point 195	693339.303	4641045.067	413.43	VIVA
point 196	693335.175	4641046.054	413.186	VIVA
point 197	693331.004	4641046.782	413.010	VIVA
point 198	693326.615	4641047.713	412.821	VIVA
point 199	693322.489	4641048.481	412.725	VIVA
point 200	693318.590	4641049.149	412.585	VIVA
point 201	693314.543	4641050.146	412.354	VIVA
point 202	693310.554	4641051.005	412.096	VIVA
point 203	693306.616	4641051.931	411.828	VIVA
point 204	693302.503	4641052.771	411.490	VIVA
point 205	693297.871	4641053.758	411.015	VIVA
point 206	693294.115	4641054.453	410.803	VIVA
point 207	693289.928	4641055.167	410.442	VIVA
point 208	693285.716	4641056.328	410.258	VIVA
point 209	693303.790	4640935.980	409.216	DUDOSA
point 210	693299.260	4640936.824	409.300	VIVA
point 211	693294.451	4640937.611	409.001	VIVA
point 212	693289.907	4640938.405	408.832	VIVA
point 213	693285.826	4640938.982	408.654	VIVA
point 214	693281.379	4640939.910	408.490	VIVA
point 215	693277.572	4640940.269	408.343	VIVA
point 216	693273.775	4640940.874	408.228	VIVA
point 217	693269.841	4640941.558	408.137	VIVA
point 218	693265.323	4640942.475	408.025	VIVA
point 219	693261.915	4640942.806	407.916	VIVA
point 220	693257.996	4640943.368	407.867	VIVA
point 221	693253.489	4640944.057	407.713	VIVA
point 222	693248.564	4640945.073	407.546	VIVA
point 223	693243.859	4640945.637	407.453	VIVA
point 224	693238.865	4640946.584	407.310	VIVA
point 225	693235.453	4640947.043	407.176	VIVA

ANEJO 6. INFORMES DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE LAS PARCELAS VOLADAS

6.1. SOTO DE CERRATO. AÑO 2013.

VUELO RGB.

Survey Data

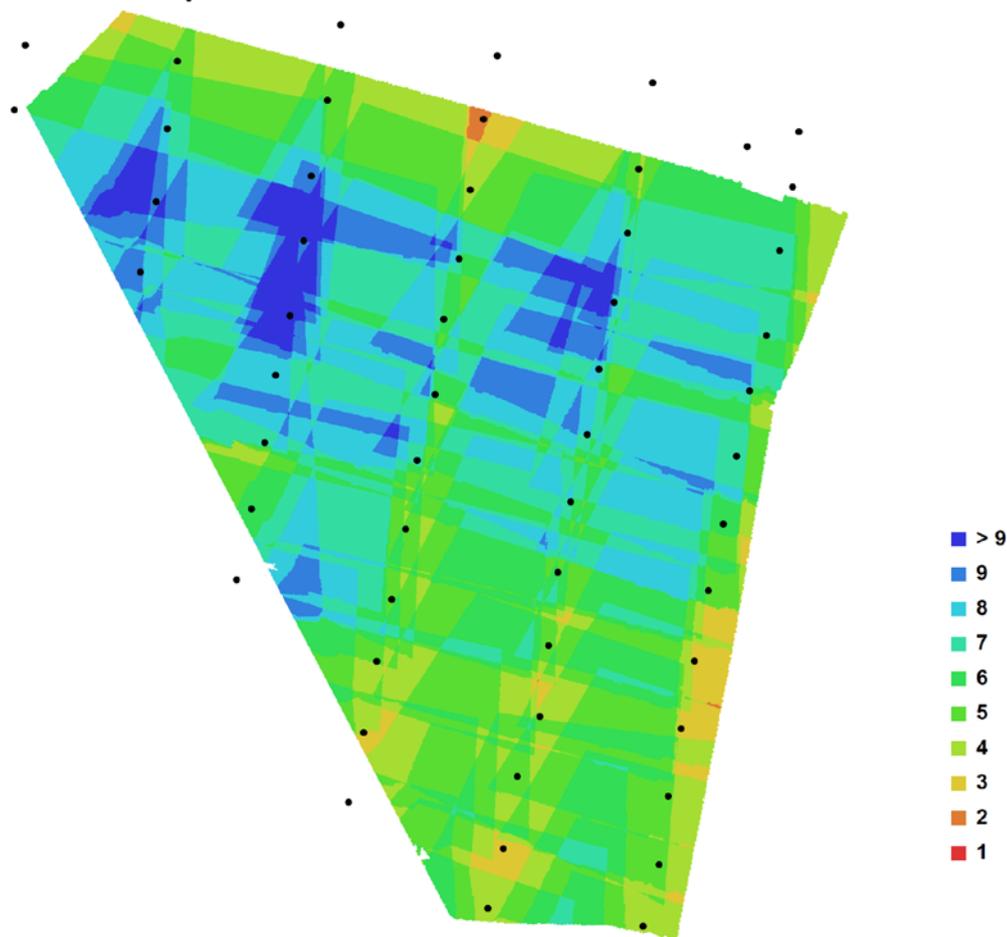


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	56	Camera stations:	56
Flying altitude:	66.3928 m	Tie-points:	134419
Ground resolution:	0.0205031 m/pix	Projections:	314150
Coverage area:	0.0338018 sq km	Error:	0.422617 pix

Ilustración 39. Datos de vuelo RGB en Soto de Cerrato. Año 2013

VUELO IRc

Survey Data

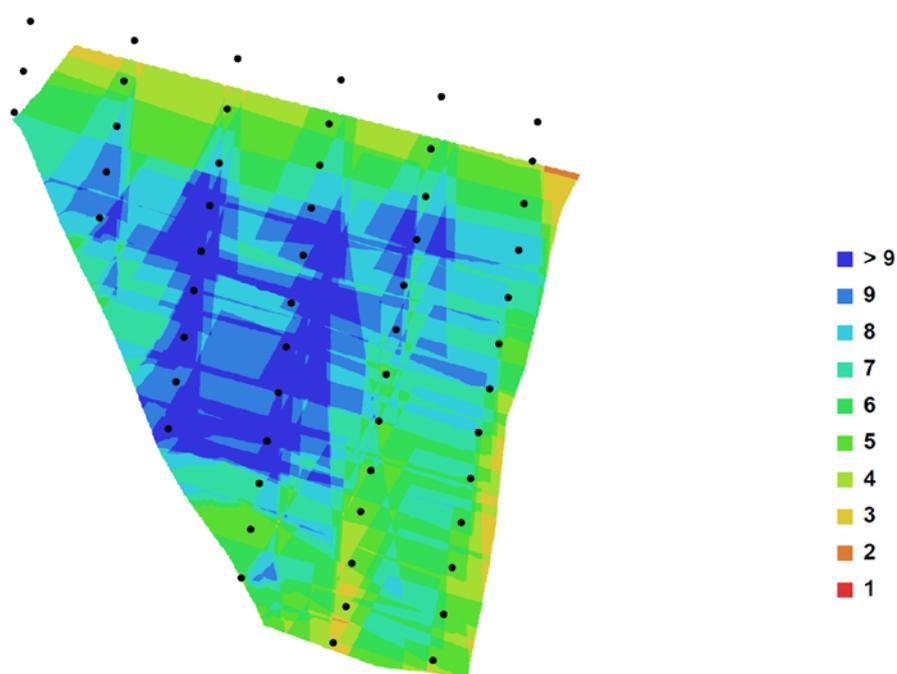


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	55	Camera stations:	55
Flying altitude:	68.2937 m	Tie-points:	87440
Ground resolution:	0.0219567 m/pix	Projections:	209481
Coverage area:	0.0377676 sq km	Error:	1.02484 pix

Ilustración 40. Datos de vuelo IRc en Soto de Cerrato. Año 2013

6.2. SARRACÍN DE ALISTE. AÑO 2013

VUELO RGB

Survey Data

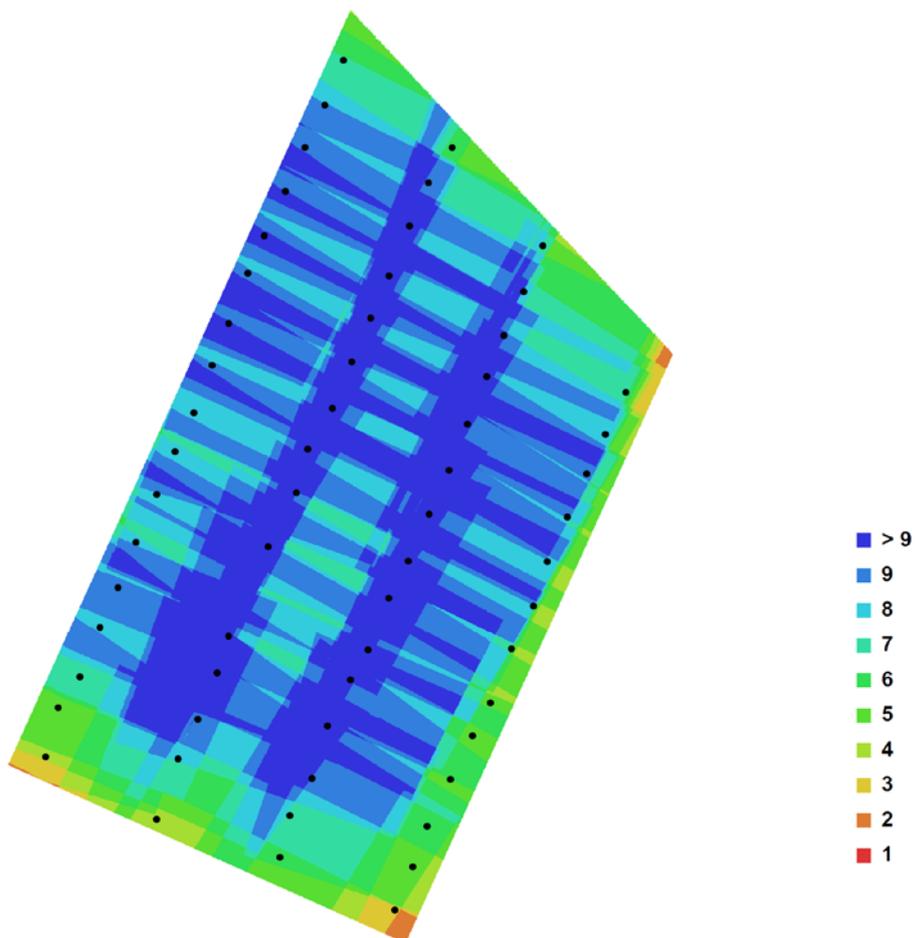


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	60	Camera stations:	60
Flying altitude:	62.0766 m	Tie-points:	406582
Ground resolution:	0.0200469 m/pix	Projections:	945689
Coverage area:	0.0252956 sq km	Error:	0.233858 pix

Ilustración 41. Datos de vuelo RGB en Sarracín de Aliste. Año 2013

VUELO IRc

Survey Data

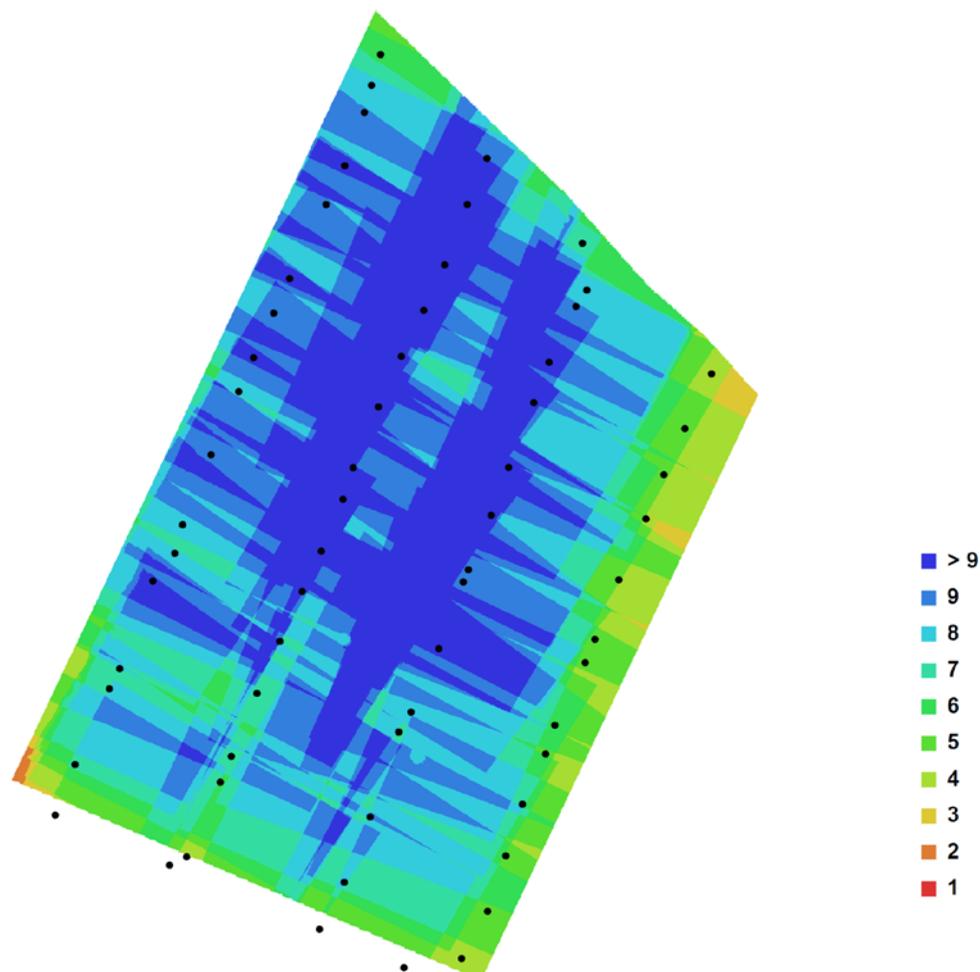


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	62	Camera stations:	62
Flying altitude:	59.7666 m	Tie-points:	510473
Ground resolution:	0.0193146 m/pix	Projections:	1150540
Coverage area:	0.0256506 sq km	Error:	0.222678 pix

Ilustración 42. Datos de vuelo IRc en Sarracín de Aliste. Año 2013

6.3. FUENSALDAÑA. AÑO 2013

VUELO RGB

Survey Data

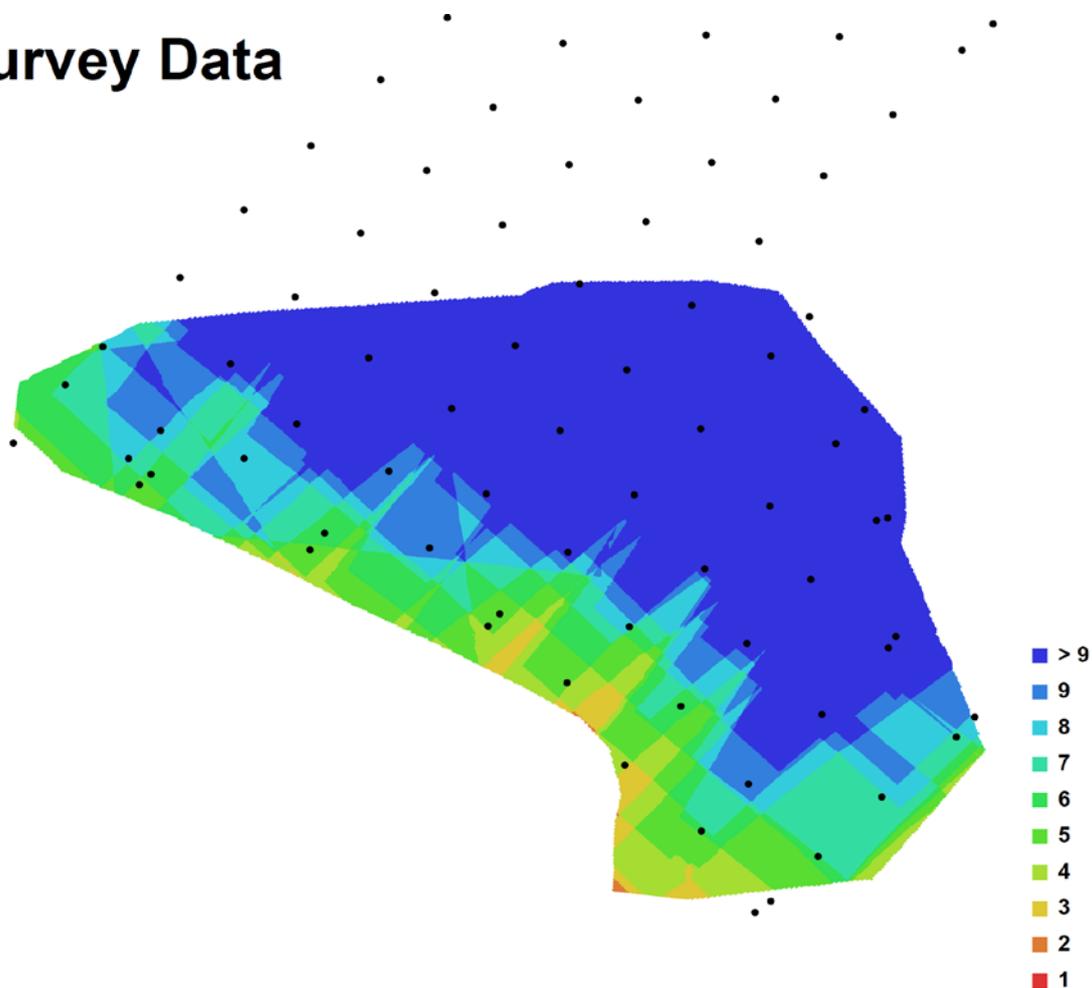


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	90	Camera stations:	90
Flying altitude:	56.831 m	Tie-points:	340778
Ground resolution:	0.0154094 m/pix	Projections:	1075581
Coverage area:	0.0088857 sq km	Error:	0.701514 pix

Ilustración 43. Datos de vuelo RGB en Fuensaldaña. Año 2013

6.4. SOTO DE CERRATO. AÑO 2014

VUELO RGB

Survey Data

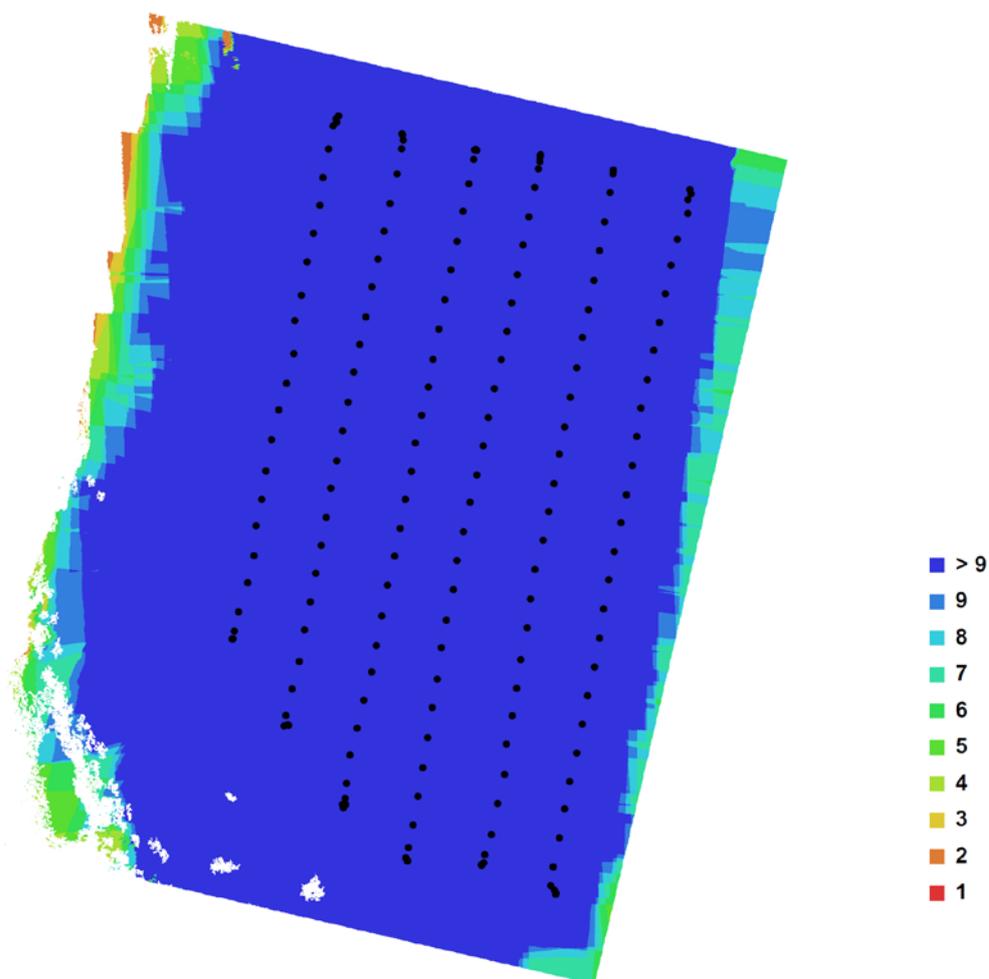


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	173	Camera stations:	173
Flying altitude:	63.3587 m	Tie-points:	809393
Ground resolution:	0.0202253 m/pix	Projections:	3977326
Coverage area:	0.0386697 sq km	Error:	0.762701 pix

Ilustración 44. Datos de vuelo RGB en Soto de Cerrato. Año 2014

6.5. FUENSALDAÑA. AÑO 2014

VUELO RGB

Survey Data

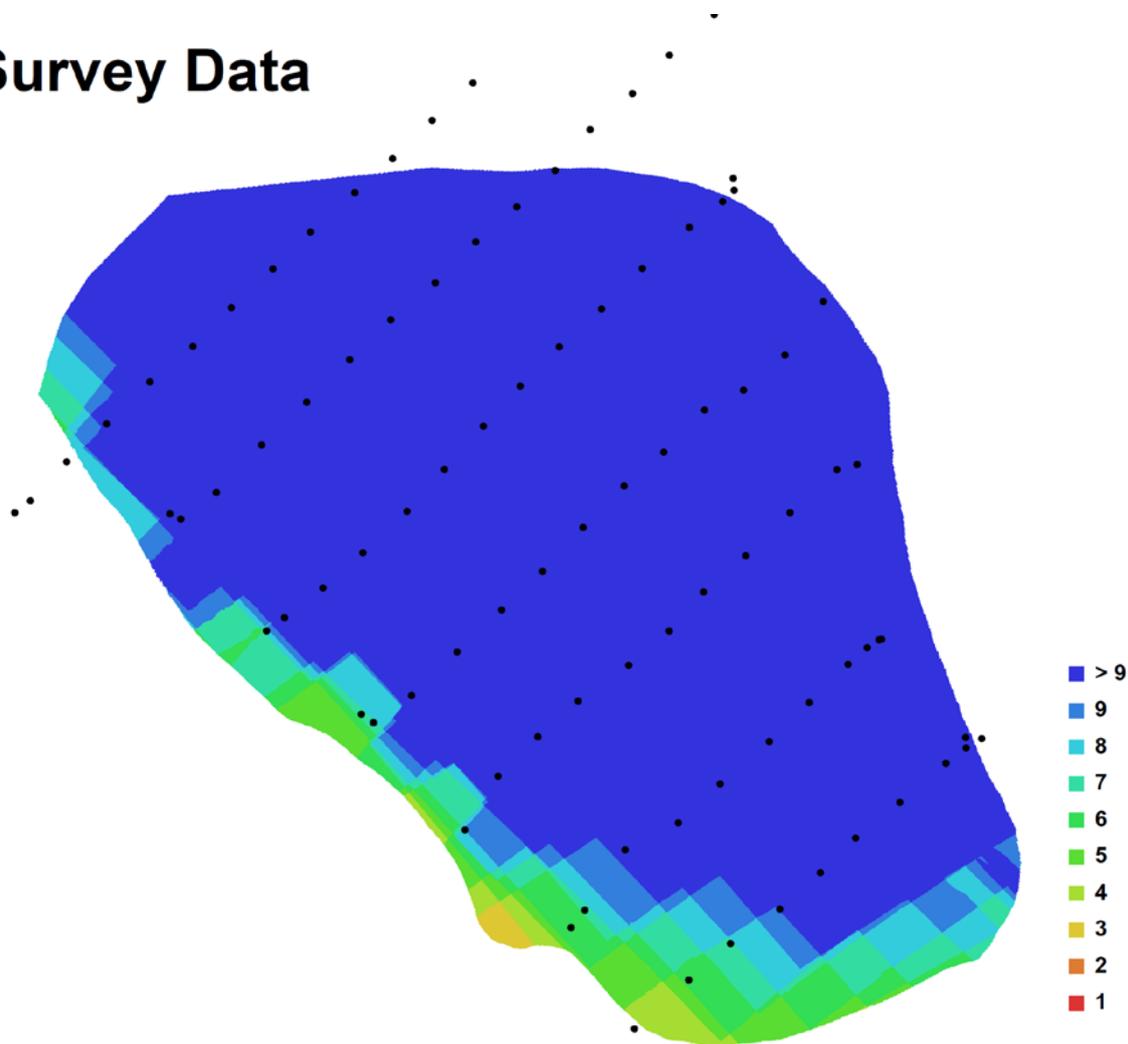


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	89	Camera stations:	89
Flying altitude:	51.6072 m	Tie-points:	388264
Ground resolution:	0.0134433 m/pix	Projections:	1598391
Coverage area:	0.00679871 sq km	Error:	0.738669 pix

Ilustración 45. Datos de vuelo RGB en Fuensaldaña. Año 2014

6.6. MATALLANA 1. AÑO 2014

VUELO RGB

Survey Data

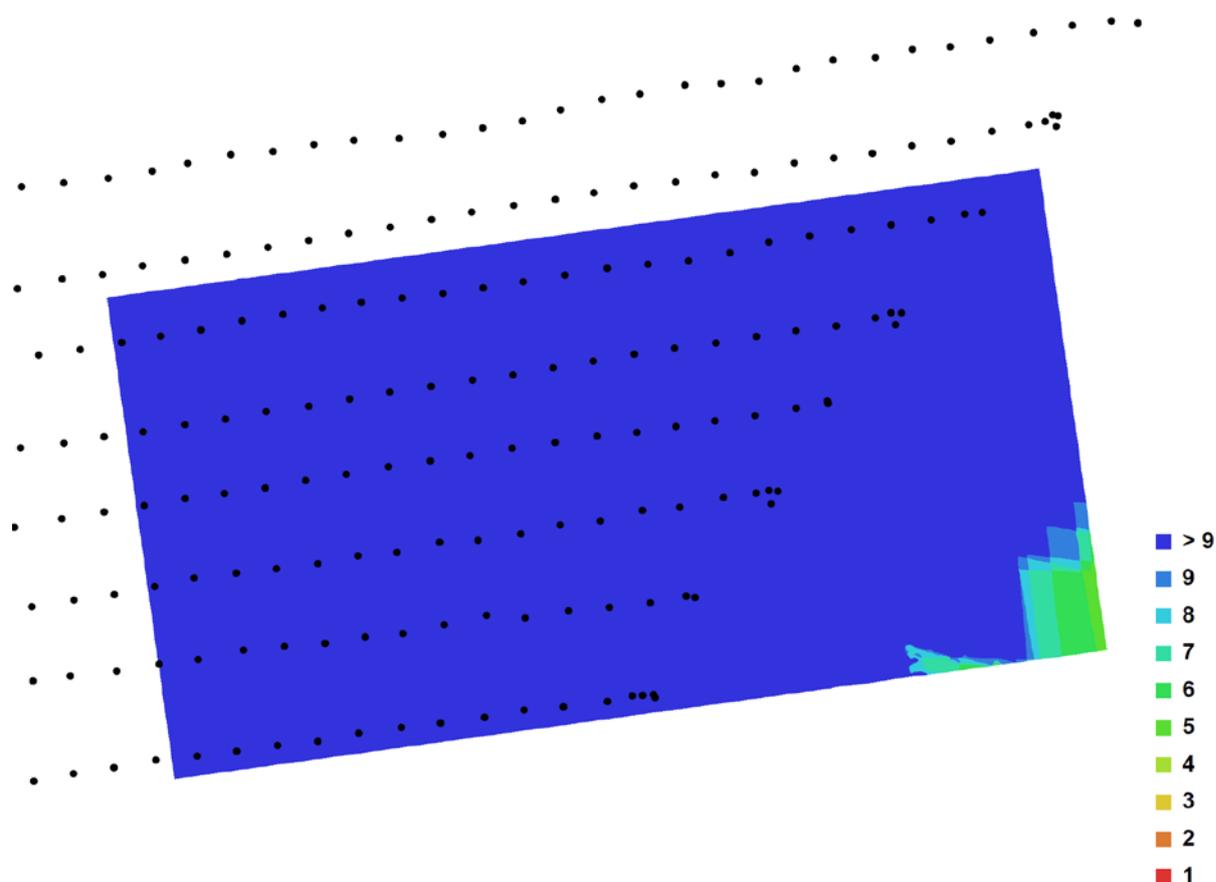


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	221	Camera stations:	221
Flying altitude:	61.4543 m	Tie-points:	973840
Ground resolution:	0.0194896 m/pix	Projections:	3871002
Coverage area:	0.0174472 sq km	Error:	0.751796 pix

Ilustración 46. Datos de vuelo RGB en la finca de Matallana 1. Año 2014

6.7. SAN ISIDRO. AÑO 2015

VUELO RGB

Survey Data

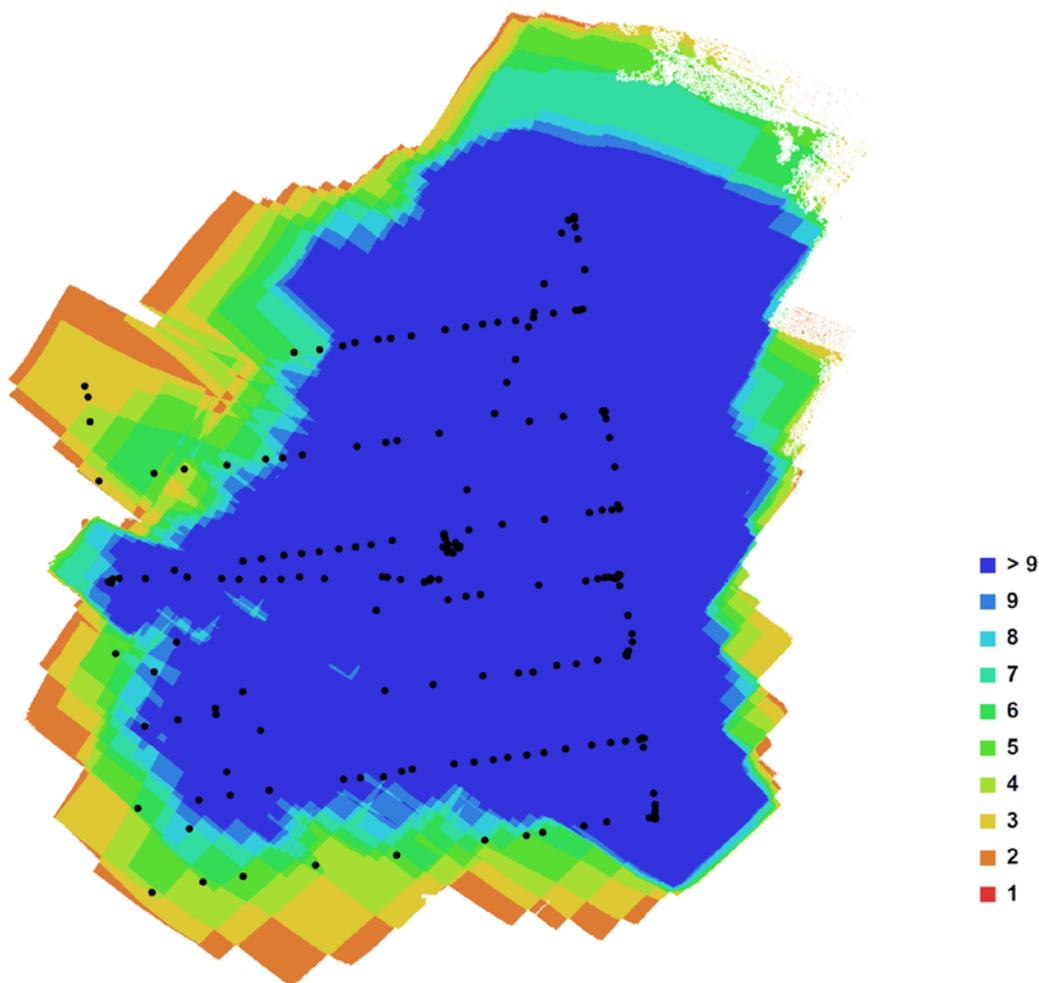


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	201	Camera stations:	201
Flying altitude:	111.662 m	Tie-points:	16007
Ground resolution:	0.0273981 m/pix	Projections:	186333
Coverage area:	0.137015 sq km	Error:	0.800663 pix

Ilustración 47. Datos de vuelo RGB en San Isidro. Año 2015

6.8. RIOFRÍO DE ALISTE. AÑO 2015

VUELO RGB

Survey Data

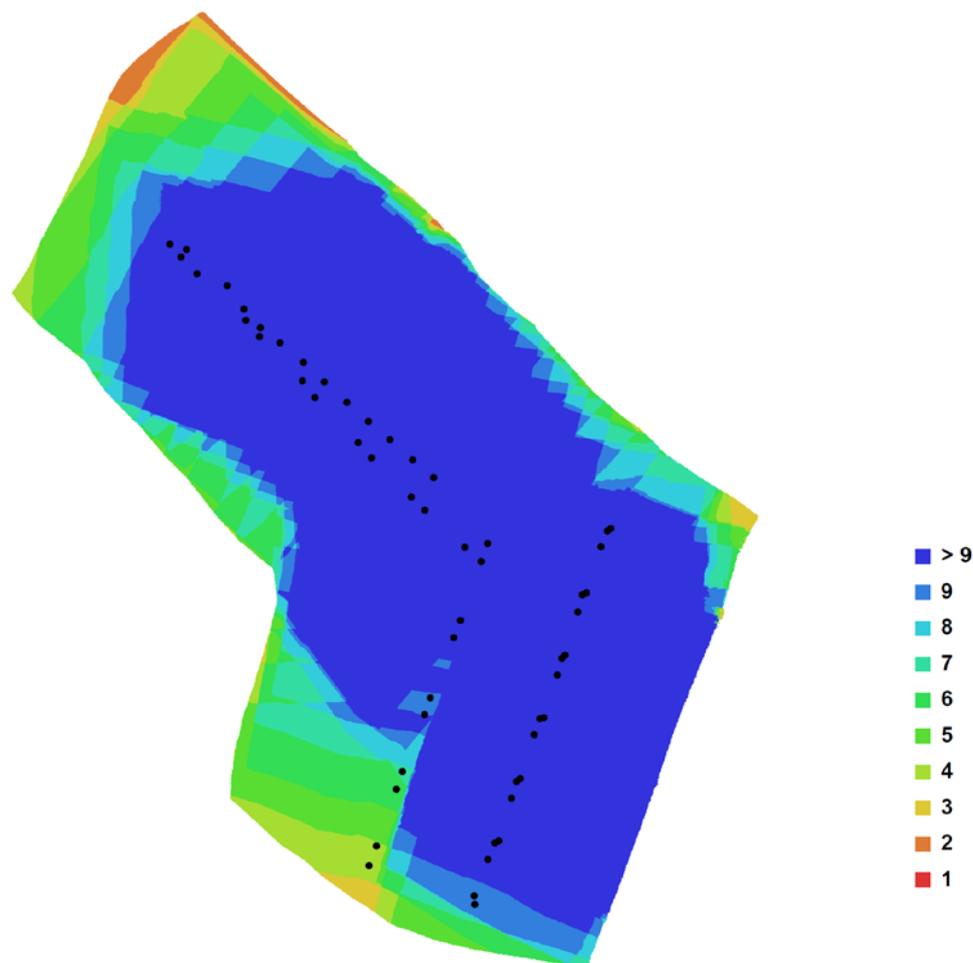


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	54	Camera stations:	54
Flying altitude:	78.1178 m	Tie-points:	340228
Ground resolution:	0.0194244 m/pix	Projections:	1227284
Coverage area:	0.0208061 sq km	Error:	0.37056 pix

Ilustración 48. Datos de vuelo RGB en Riofrío de Aliste. Año 2015

6.9. PEDRAJAS DE SAN ESTEBAN. AÑO 2015

VUELO RGB

Survey Data

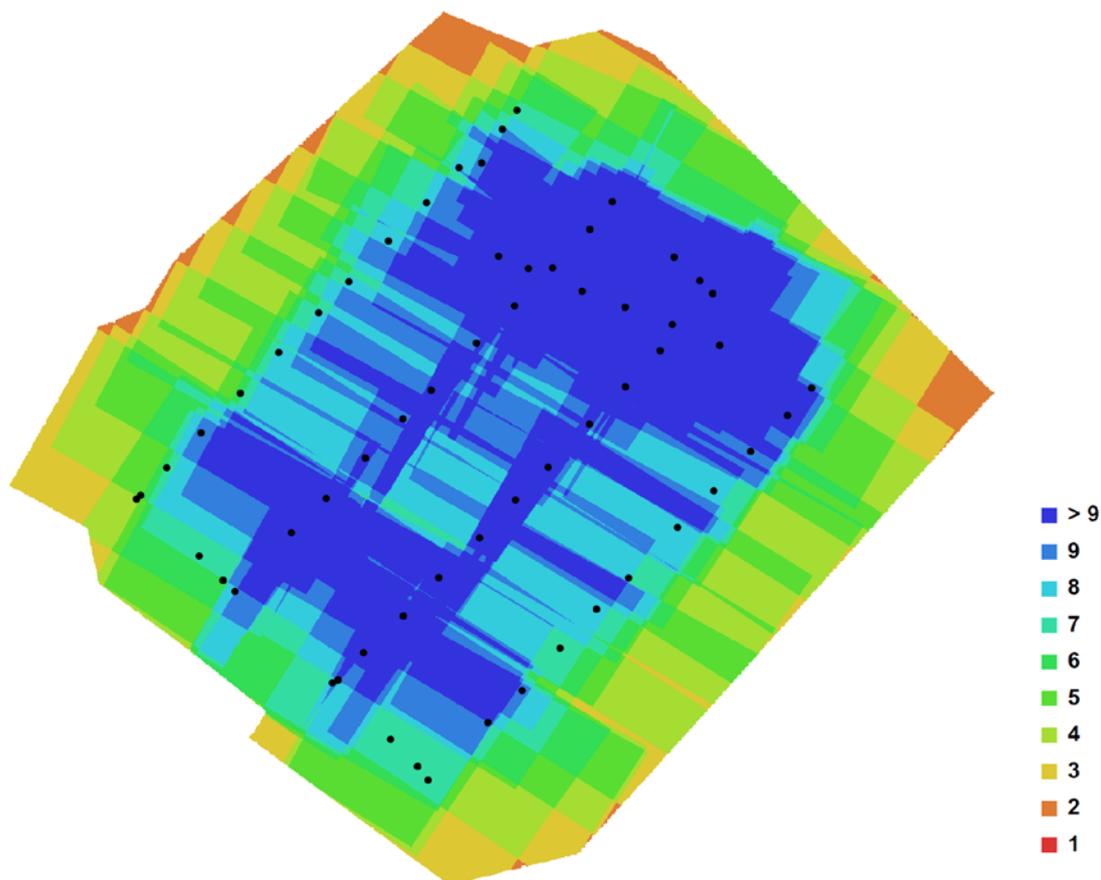


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	62	Camera stations:	60
Flying altitude:	106.908 m	Tie-points:	9783
Ground resolution:	0.0259993 m/pix	Projections:	51507
Coverage area:	0.0667318 sq km	Error:	0.903539 pix

Ilustración 49. Datos de vuelo RGB en Pedrajas de San Esteban. Año 2015

6.10. SAN MATEO. AÑO 2015

VUELO RGB

Survey Data

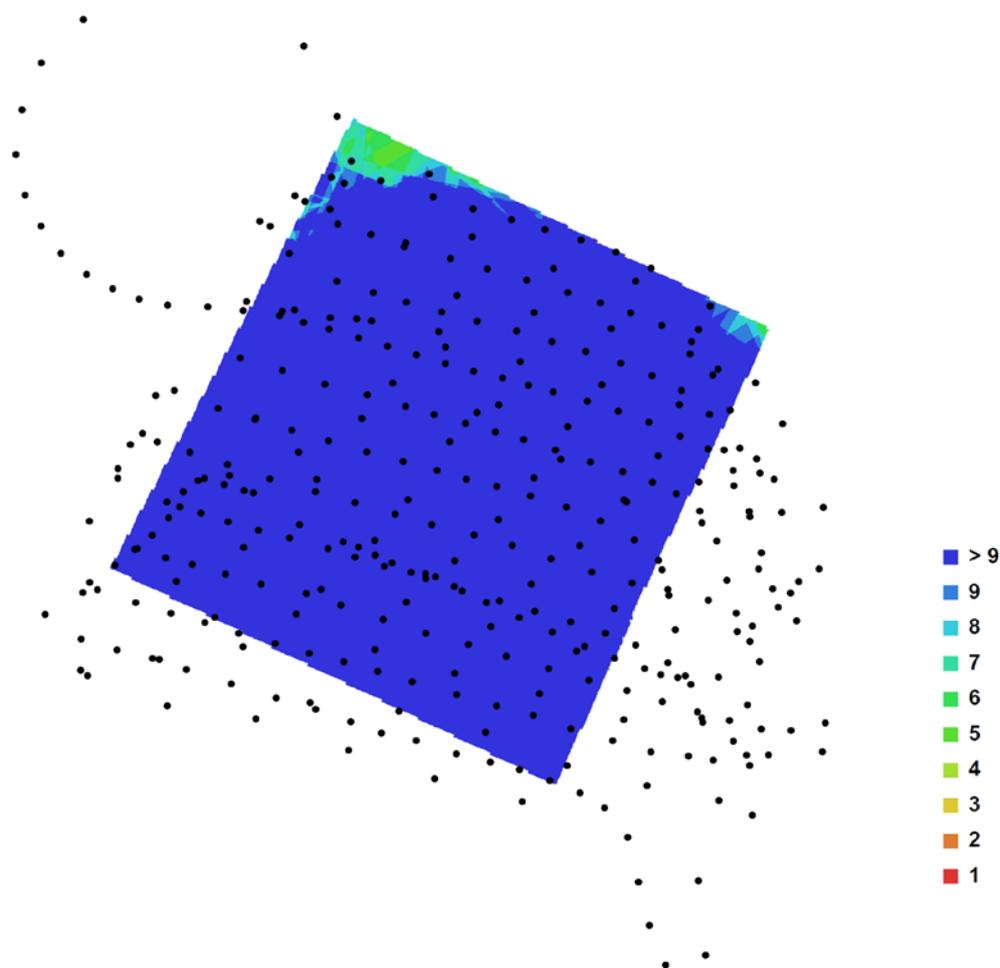


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	401	Camera stations:	348
Flying altitude:	126.887 m	Tie-points:	45012
Ground resolution:	0.0315822 m/pix	Projections:	265202
Coverage area:	0.180341 sq km	Error:	2.22845 pix

Ilustración50. Datos de vuelo RGB en San Mateo de Gállego. Año 2015

VUELO IRc

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro - Versión de prueba version 1.4.46

! Important: Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the feature

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary i

Project	san mateo
Processed	2015-Jun-19 13:43:01
Camera Model Name	TetracamADC_0.0_2048x1536 (IR,Red,Green)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.53 cm / 1.78 in
Area Covered	0.4802 km ² / 48.0177 ha / 0.1855 sq. mi. / 118.716 acres
Image Coordinate System	WGS84
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 30N
Processing Type	rapid Alternative processing mode
Feature Extraction Image Scale	1
Camera Model Parameter Optimization	optimize externals and all internals
Time for Initial Processing (without report)	15m:45s

Quality Check i

? Images	median of 2251 keypoints per image	✓
? Dataset	269 out of 403 images calibrated (66%), all images enabled	⚠
? Camera Optimization	43.53% relative difference between initial and final focal length	⚠
? Matching	median of 328.178 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	no 3D GCP	⚠

? Preview i

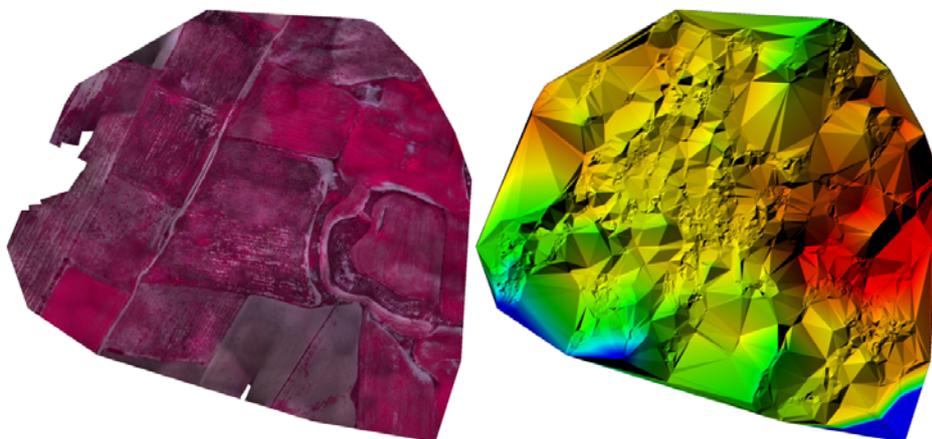


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Ilustración 51. Datos de vuelo IRc en San Mateo de Gállego. Año 2015

6.11. MATA LLANA 2

VUELO IRC

Quality Report

 Generated with Pix4Dmapper Pro - Versión de prueba version 1.4.46

! Important: Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the feature

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary **i**

Project	matallana
Processed	2015-Jun-19 15:58:57
Camera Model Name	Tetracam/ADC_8.0_2048x1536 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	6.41 cm / 2.52 in
Area Covered	0.9418 km ² / 94.178 ha / 0.3638 sq. mi. / 232.839 acres
Image Coordinate System	WGS84
Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 30N
Processing Type	rapid Alternative processing mode
Feature Extraction Image Scale	1
Camera Model Parameter Optimization	optimize externals and all internals
Time for Initial Processing (without report)	10m:26s

Quality Check **i**

? Images	median of 1986 keypoints per image	
? Dataset	284 out of 415 images calibrated (68%), all images enabled, 3 blocks	
? Camera Optimization	53.45% relative difference between initial and final focal length	
? Matching	median of 346.468 matches per calibrated image	
? Georeferencing	no 3D GCP	

? Preview **i**

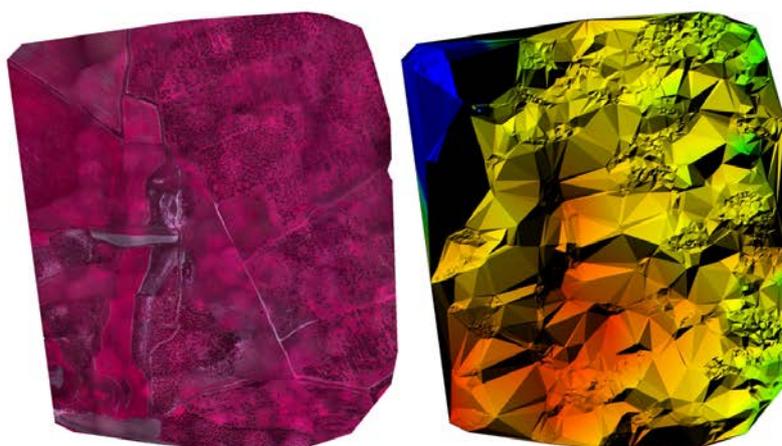


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Ilustración 52. Datos de vuelo RGB Matallana 2. Año 2015

