



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*Escuela Politécnica Superior de Jaén*

Trabajo Fin de Grado

# **ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS AÉREAS NO TRIPULADAS (UAV)**

**Alumno: Ana Gómez López**

Tutor: Prof. D. José Luis Pérez García  
Prof. D. Francisco Javier Cardenal Escarcena  
Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y  
Fotogrametría

**Septiembre, 2015**



Universidad de Jaén  
Escuela Politécnica Superior de Jaén  
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Don JOSÉ LUIS PÉREZ GARCÍA y Don FRANCISCO JAVIER CARDENAL ESCARCENA, tutores del Proyecto Fin de Grado titulado: ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS AÉREAS NO TRIPULADAS (UAV) , que presenta ANA GÓMEZ LÓPEZ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2015

El alumno:

Los tutores:

ANA GÓMEZ LÓPEZ

JOSÉ LUIS PÉREZ GARCÍA

FRANCISCO JAVIER CARDENAL ESCARCENA

**Contenido**

Resumen .....	8
Abstract.....	8
1. Introducción .....	11
1.1. Estructura del TFG .....	13
1.2. Justificación .....	14
1.3. Objetivos.....	18
2. Proceso metodológico .....	22
2.1. Vehículos aéreos no tripulados (UAV) .....	23
2.2. Escáner láser terrestre (TLS) .....	35
2.3. Análisis multitemporal.....	42
3. Aplicación práctica .....	46
3.1. Instrumental y Software.....	46
3.2. Situación y emplazamiento.....	53
3.3. Selección del sistema de referencia a emplear para controlar la deformación ...	55
3.4. Plataforma aérea no tripulada Falcon 8 .....	58
3.5. Escáner láser terrestre. ....	76
3.6. Estudio multitemporal. Comparación entre las campañas de observación.....	89
4. Análisis de resultados y conclusiones .....	94
4.1. Control de la captura de datos .....	94
4.2. Control del proceso de orientación y georreferenciación de los datos.....	106
4.3. Control de superficies.....	108
4.4. Análisis del estudio multitemporal y los resultados del mismo .....	112
4.5. Análisis de viabilidad .....	118
4.6. Conclusiones .....	118
Bibliografía.....	125
Anejos .....	129
Anejo 1. Apoyo Fotogramétrico .....	129
Anejo 2. Captura de datos. Vuelos fotogramétricos .....	132
Anejo 3. Resultados de orientación fotogramétrica. Precisiones .....	134
Anejo 4. Resultados de orientación fotogramétrica. Parámetros de Orientación Externa .....	136
Productos. Modelos Digitales y Ortofotografías.....	141

**Índice de figuras**

FIGURA 1.1. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	14
FIGURA 1.2. GRÁFICO QUE RELACIONA MÉTODOS CON PRECISIÓN Y TAMAÑO DEL OBJETO. ADAPTADO DE [1].....	17
FIGURA 2.1. PROCESO METODOLÓGICO .....	22
FIGURA 2.2. CROQUIS EXPLICATIVO Y FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE MARCAS .....	30
FIGURA 2.3. ORIENTACIÓN INTERNA DIGITAL. ADAPTACIÓN DE [4].....	33
FIGURA 2.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO TLS. ....	36
FIGURA 3.1. APLICACIÓN PRÁCTICA .....	46
FIGURA 3.2. SISTEMA UAV FALCON 8 AscTEC.....	48
FIGURA 3.3. ZONA DE ESTUDIO.....	53
FIGURA 3.4. FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA ZONA DE ESTUDIO COMPLETA. ....	53
FIGURA 3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS HOJAS DEL MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL A ESCALA 1/50000 EN LA PROVINCIA DE JAÉN .....	54
FIGURA 3.6. MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL 1:25000, EPSG: 2583, HOJA 947- 1 (JAÉN) .....	54
FIGURA 3.7. IMPLANTACIÓN DE UNA BASE DE REFERENCIA EN UNA ZONA ESTABLE Y EXTERNA A LA CARRETERA. ....	56
FIGURA 3.8. HUELLA DE LA FOTOGRAFÍAS EN EL TERRENO OBTENIDAS CON AscTEC NAVIGATOR. ....	60
FIGURA 3.9. DIANA EMPLEADA PARA EL APOYO FOTOGRAMÉTRICO .....	61
FIGURA 3.10. PLANIFICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL. (EN ROJO LOS PUNTOS DE CONTROL, EN AMARILLO PUNTOS DE DISPARO).....	62
FIGURA 3.11. OBSERVACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL.....	66
FIGURA 3.12. DISTRIBUCIÓN PUNTOS DE CONTROL. CAMPAÑA 20141223 .....	67
FIGURA 3.13. DISTRIBUCIÓN PUNTOS DE CONTROL. CAMPAÑA 20150327 .....	67
FIGURA 3.14. VUELO MEDIANTE UAV FALCON 8. ....	68
FIGURA 3.15. MODELO AGISOFT PHOTOSCAN.....	69
FIGURA 3.16. FOTOGRAFÍAS TOMADAS DURANTE EL VUELO CON UAV FALCON 8. CAMAPAÑA 20150327	69
FIGURA 3.17. LÍNEAS BASE PUNTOS DE CONTROL (CAPTURA DE PANTALLA DE LEICA GEOOFFICE) .....	70
FIGURA 3.18. DETECCIÓN Y CÁLCULO DE PUNTOS HOMÓLOGOS. LA IMAGEN MUESTRA LAS CORRESPONDENCIAS (PUNTOS AJUSTADOS) ENTRE DOS CÁMARAS PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS.....	73
FIGURA 3.19. MEDIDA DE PUNTOS DE CONTROL EN AGISOFT PHOTO SCAN. ....	74
FIGURA 3.20. RECONSTRUCCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS DENSA EN PHOTO SCAN.....	75
FIGURA 3.21. MALLAS POLIGONALES OBTENIDAS MEDIANTE PHOTO SCAN. DE IZQUIERDA A DERECHA: SOMBREADO EN COLOR, SOMBREADO MONOCROMÁTICO, MALLA POLIGONAL.....	75
FIGURA 3.22. RESULTADO DEL TEXTURIZADO CON AGISOFT PHOTO SCAN. ....	76
FIGURA 3.23. PLANIFICACIÓN POSICIONES ÓPTIMAS DEL ESCÁNER LÁSER.....	77
FIGURA 3.24. CROQUIS DE LAS ÁREAS CUBIERTAS DESDE CADA ESTACIÓN DE ESCANEEO. ....	77
FIGURA 3.25. CAPTURA CON TLS LEICA SCANSTATION C10. ....	78
FIGURA 3.26. EXPORTACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS A FORMATO .PTX CON CYCLONE. ....	80
FIGURA 3.27. USO DEL TLS C10 CON ANTENA GS15. OFFSET LASER ORIGIN= 117.5 MM .....	81
FIGURA 3.28. CENTROIDE POR AJUSTE DE UN CÍRCULO .....	83
FIGURA 3.29. CÁLCULO DE LOS ÁNGULOS DE ROTACIÓN .....	84
FIGURA 3.30. ROTACIÓN SCAN 7 (EN COLOR VERDE), DESDE SU POSICIÓN EN EL SISTEMA LOCAL (A) A SU POSICIÓN EN EL SISTEMA DE REFERENCIA GLOBAL (B).....	85
FIGURA 3.31. FILTRADO POR POLÍGONO DE LA NUBE DE PUNTOS PROCEDENTE DEL TLS. EL POLÍGONO USADO SE CORRESPONDE CON EL ÁREA ANALIZADA CON EL UAV. ....	86
FIGURA 3.32. FILTRADO POR PROXIMIDAD A UNA SUPERFICIE.....	87
FIGURA 3.33. COMPROBACIÓN VISUAL MEDIANTE EMPLEO DE DISTINTOS COLORES. ....	87
FIGURA 3.34. INSPECCIÓN VISUAL MEDIANTE LÍNEAS DE LA CARRETERA Y QUITAMIEDOS.....	88

FIGURA 3.35. SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA CARRETERA. LOS DIFERENTES COLORES ESTÁN ENTREMEZCLADOS Y NO SE SUPERPONEN UNOS A OTROS, LO CUAL ES INDICATIVO DE UNA FUSIÓN CORRECTA DE LAS NUBES.....	88
FIGURA 3.36. SUPERFICIE OBTENIDA MEDIANTE TRIANGULACIÓN TOPOGRÁFICA.....	89
FIGURA 3.37. COMPARACIÓN DE SUPERFICIES MEDIANTE MAPTEK I-SITE .....	90
FIGURA 3.38. ANÁLISIS SOBRE ORTOFOTOGRAFÍAS. ORTOFOTOGRAFÍAS PERTENECIENTES A LA CAMPAÑA 20140117 (IZQUIERDA) Y 20141223 (DERECHA). LAS LÍNEAS AMARILLAS CORRESPONDEN A LA CAMPAÑA 20140117 APRECIÁNDOSE CLARAMENTE EL DESPLAZAMIENTO. ....	91
FIGURA 4.1. ESTRUCTURA DEL APARTADO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	94
FIGURA 4.2. DIFERENCIAS DE COORDENADAS ENTRE LOS PUNTOS DE TOMA DE IMÁGENES PLANIFICADOS Y LOS OBTENIDOS. CAMPAÑA 20141223 .....	99
FIGURA 4.3. DIFERENCIAS DE COORDENADAS ENTRE LOS PUNTOS DE TOMA DE IMÁGENES PLANIFICADOS Y LOS OBTENIDOS. CAMPAÑA 20150327 .....	103
FIGURA 4.4. CONTROL DE CALIDAD DE LA SUPERFICIE MEDIANTE PC. CAMPAÑA 20141223.....	110
FIGURA 4.5. CONTROL DE CALIDAD DE LA SUPERFICIE MEDIANTE PC. CAMPAÑA 20150327.....	111
FIGURA 4.6. CONTROL DE CALIDAD DE LA SUPERFICIE MEDIANTE PC. CAMPAÑA TLS 20150327 .....	112
FIGURA 4.7. MAPA DE COLOR, RESULTANTE DE LA COMPARATIVA ENTRE LAS CAMPAÑAS 20141223 Y 20150327, JUNTO CON EL HISTOGRAMA Y ESCALA DE COLOR UTILIZADA.....	113
FIGURA 4.8. MAPA DE COLOR, RESULTANTE DE LA COMPARATIVA ENTRE LAS CAMPAÑAS 20140117 Y 20150327, JUNTO CON EL HISTOGRAMA Y ESCALA DE COLOR UTILIZADA.....	114
FIGURA 4.9. CAPTURAS CORRESPONDIENTES A LAS ORTOFOTOGRAFÍAS DE LAS CAMPAÑAS 2014117, 20141223 Y 20150327 (DE IZQUIERDA A DERECHA). ....	115
FIGURA 4.10. MEDIDAS DE DESPLAZAMIENTO. EN ROJO CAMPAÑA DE REFERENCIA (20140117) Y EN NEGRO CAMPAÑA MÁS RECIENTE (20150327). LAS FLECHAS EN INDICAN LA DIRECCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO. ....	116
FIGURA 4.11. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS. CAMPAÑA 20150327.....	117
FIGURA 4.12. RUGOSIDAD DE LOS MDS OBTENIDOS POR TLS (IZQUIERDA) Y UAV (DERECHA) .....	120
FIGURA 4.13. COMPARACIÓN TÉCNICA UAV Y TLS .....	121
FIGURA 0.1. DISTRIBUCIÓN PC. CAMPAÑA 20140117 .....	129
FIGURA 0.2. DISTRIBUCIÓN PC. CAMPAÑA 20141223 .....	130
FIGURA 0.3. DISTRIBUCIÓN PC. CAMPAÑA 20150327 .....	131
FIGURA 0.4. GRÁFICO PUNTOS DE DISPARO. CAMPAÑA UAV_2014017. ....	132
FIGURA 0.5. GRÁFICO PUNTOS DE DISPARO. CAMPAÑA UAV_20141223. ....	132
FIGURA 0.6. GRÁFICO PUNTOS DE DISPARO. CAMPAÑA UAV_20141223. ....	133

**Índice de tablas**

TABLA 2.1. PARÁMETROS DEL PLAN DE VUELO .....	27
TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS LEICA GX1230.....	47
TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS RECEPTOR GS15.....	48
TABLA 3.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS SISTEMA UAV, MODELO FALCON 8 DE ASCTEC. ....	49
TABLA 3.4. CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA SONY NEX-5N.....	49
TABLA 3.5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS SISTEMA UAV, MODELO FV8 DE ATYGES.....	49
TABLA 3.6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS CÁMARA OPTRIS PI 400.....	50
TABLA 3.7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS TLS LEICASTATION C10.....	50
TABLA 3.8. COORDENADAS UTM DEL RECEPTOR FIJO (ESTACIÓN DE REFERENCIA PERMANENTE DE LA UNIVERSIDAD DE JAÉN) Y DEL RECEPTOR MÓVIL ESTACIONADO SOBRE TRÍPODE (BASE). ....	57
TABLA 3.9. PARÁMETROS DE VUELO INTRODUCIDOS EN ASCTEC NAVIGATOR .....	59
TABLA 3.10. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE LAS MARCAS. (*); A PARTIR DE LOS DATOS DEL ARCHIVO EXIF). ....	61
TABLA 3.11. CONDICIONES METEOROLÓGICAS CORRESPONDIENTES A LAS DOS CAMPAÑAS REALIZADAS (DATOS TOMADOS DE: <a href="http://www.ujaen.es/dep/fisica/estacion/historico1.html">HTTP://WWW.UJAE.N.ES/DEP/FISICA/ESTACION/HISTORICO1.HTML</a> ). ....	68
TABLA 3.12. CAMPAÑAS DE OBSERVACIÓN REALIZADAS CON SISTEMA UAV.....	70
TABLA 3.13. DESVIACIONES TÍPICAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL Y LA BASE (B). CAMPAÑA 20150327 .	71
TABLA 3.14. RESULTADO PUNTOS DE CONTROL CAMPAÑA 20141223 .....	72
TABLA 3.15. RESULTADO PUNTOS DE CONTROL CAMPAÑA 20150327. ....	72
TABLA 3.16. CARACTERÍSTICAS CORRESPONDIENTES A LA CAMPAÑA TLS. ....	79
TABLA 3.17. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESCANEOS REALIZADOS .....	79
TABLA 3.18. PUNTOS DE CONTROL CAMPAÑA TLS.....	80
TABLA 3.19. COORDENADAS TERRENO PERTENECIENTES AL APOYO DEL TLS.....	82
TABLA 3.20. COORDENADAS MODELO (X', Y') Y COORDENADAS TERRENO (X, Y) DE LOS PUNTOS DE CONTROL.....	83
TABLA 3.21. ÁNGULOS DE ROTACIÓN OBTENIDOS QUE DEBEN SER APLICADOS A CADA ESCAÑO. ....	84
TABLA 4.1. DATOS CORRESPONDIENTES A LA PLANIFICACIÓN DEL UAV. CAMPAÑA 20141223. (*) INCLINACIÓN DE LA CÁMARA .....	96
TABLA 4.2. DATOS REALES CORRESPONDIENTES A LA CAMPAÑA 20141223. (*) INCLINACIÓN DE LA CÁMARA. ....	97
TABLA 4.3. DIFERENCIAS ENTRE DATOS DE VUELO PLANIFICADO Y REAL. CAMPAÑA 20141223.....	98
TABLA 4.4. DATOS CORRESPONDIENTES A LA PLANIFICACIÓN DEL UAV. CAMPAÑA 20150327. (*) INCLINACIÓN DE LA CÁMARA. ....	100
TABLA 4.5. DATOS REALES CORRESPONDIENTES A LA CAMPAÑA 20150327. (*) INCLINACIÓN DE LA CÁMARA. ....	101
TABLA 4.6. DIFERENCIAS ENTRE DATOS DE VUELO PLANIFICADO Y REAL. CAMPAÑA 20150327.....	102
TABLA 4.7. VARIACIÓN EN ALTURA (DZ) DE CADA PUNTO DE DISPARO CON RESPECTO A LA MEDIA (X), ASÍ COMO SU DESVIACIÓN ESTÁNDAR ( $\Sigma$ ). CAMPAÑA 20141223 .....	104
TABLA 4.8. VARIACIÓN EN ALTURA (DZ) DE CADA PUNTO DE DISPARO CON RESPECTO A LA MEDIA (X), ASÍ COMO SU DESVIACIÓN ESTÁNDAR ( $\Sigma$ ). CAMPAÑA 20150327 .....	105
TABLA 4.9. COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL (PC), COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE COMPROBACIÓN (CP) Y DIFERENCIAS ENTRE AMBAS. CAMPAÑA 20141223 .....	106
TABLA 4.10. VALORES ESTADÍSTICOS RESULTANTES DEL CONTROL DEL PROCESO DE ORIENTACIÓN DEL BLOQUE FOTOGRAMÉTRICO. CAMPAÑA 20141223.....	107
TABLA 4.11. COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL (PC), COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE COMPROBACIÓN (CP) Y DIFERENCIAS ENTRE AMBAS. CAMPAÑA 20150327. ....	107
TABLA 4.12. VALORES ESTADÍSTICOS RESULTANTES DEL CONTROL DEL PROCESO DE ORIENTACIÓN DEL BLOQUE FOTOGRAMÉTRICO. CAMPAÑA 20150327.....	107

TABLA 4.13. COORDENADAS TERRENO DE LOS PC OBTENIDAS MEDIANTE GNSS, COORDENADAS MODELO DE LOS PC Y DIFERENCIAS ENTRE AMBAS.* ESTE DATO NO SE TIENE EN CUENTA PARA EL CÁLCULO DE LOS VALORES ESTADÍSTICOS POR TRATARSE DE UN ERROR GROSERO. ....	108
TABLA 4.14. VALORES ESTADÍSTICOS DE LOS PC, EN EL AJUSTE DEL TLS .....	108
TABLA 4.15. CONTROL SUPERFICIE UAV. CAMPAÑA 20141223 .....	109
TABLA 4.16. CONTROL SUPERFICIE UAV. CAMPAÑA 20150327 .....	110
TABLA 4.17. CONTROL SUPERFICIE TLS. CAMPAÑA 20150327 .....	112
TABLA 0.1. COORDENADAS PC. CAMPAÑA 20140117 .....	129
TABLA 0.2. COORDENADAS PC. CAMPAÑA 20141223.....	130
TABLA 0.3. COORDENADAS PC. CAMPAÑA 20150327 .....	131
TABLA 0.4. PRECISIONES DE LA ORIENTACIÓN FOTOGAMÉTRICA CON AGISOFT PHOTOSCAN. CAMPAÑA 20140117.....	134
TABLA 0.5. PRECISIONES DE LA ORIENTACIÓN FOTOGAMÉTRICA CON AGISOFT PHOTOSCAN. CAMPAÑA 20141223.....	135
TABLA 0.6. PRECISIONES DE LA ORIENTACIÓN FOTOGAMÉTRICA CON AGISOFT PHOTOSCAN. CAMPAÑA 20150327 .....	135
TABLA 0.7. RESULTADOS ORIENTACIÓN FOTOGAMÉTRICA CON AGISOFT PHOTOSCAN. CAMPAÑA 20140117.....	137
TABLA 0.8. RESULTADOS ORIENTACIÓN FOTOGAMÉTRICA CON AGISOFT PHOTOSCAN. CAMPAÑA 20141223.....	138
TABLA 0.9. RESULTADOS ORIENTACIÓN FOTOGAMÉTRICA CON AGISOFT PHOTOSCAN. CAMPAÑA 2015032.....	139

## Resumen

*Este Trabajo Fin de Grado (TFG) plantea determinar la viabilidad del empleo de plataformas aéreas no tripuladas (unmanned aerial vehicles, UAV) con técnicas de fotogrametría y el uso de otras técnicas de escáner láser terrestre (TLS) para estimar la deformación horizontal y vertical en firmes de carretera causada por procesos de inestabilidad de ladera. Con este fin, se han realizado dos campañas de campo en una zona próxima al núcleo urbano de La Guardia de Jaén, en el entorno de la carretera A-3200, en la que se han identificado importantes movimientos de ladera. Además estas campañas se han comparado con otra campaña anterior. Finalmente, y gracias al empleo de estas técnicas, se ha permitido caracterizar la deformación y se han determinado desplazamientos tanto en la vertical como en la horizontal, del orden de 0.5 m, garantizando la viabilidad de las técnicas geomáticas empleadas.*

## Abstract

*This Degree Thesis is proposed in order to determine the viability of using unmanned aerial vehicles (UAVs) with photogrammetric techniques and terrestrial laser scanner (TLS) techniques to estimate the horizontal and vertical deformation in road pavements caused by slope instability processes. With this aim, two field campaigns have been carried out in an area close to La Guardia of Jaén (Province of Jaén, Southern Spain) , near the A-3200 road, where significant slope movements have been identified. In addition, these campaigns have been compared with a previous campaign. Finally, these techniques have allowed the monitoring deformation and displacement vectors have been identified in the order of 0.5 m, both in horizontal and vertical, guaranteeing the viability of the geomatic techniques employed in this thesis.*

# Capítulo 1

---



## 1. Introducción

En este documento se presenta la memoria correspondiente al Trabajo Fin de Grado (TFG) de la titulación Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica titulado "Análisis de deformación de firmes de carretera mediante plataformas aéreas no tripuladas (UAV)". El Plan de Estudios para la titulación de Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica fue publicado en el BOE el 3 de Julio de 2010, y dentro de la estructura de estudios conducentes a la obtención de dicho título se incluye la realización de una asignatura de carácter obligatorio "Trabajo Fin de Grado" con una carga docente total de 12 créditos.

El término Geomática fue acuñado en 1969 por Bernard Dubuisson e integraría a todas la ciencias de base y a las tecnologías utilizadas para el conocimiento del territorio como son Topografía, SIG, Teledetección, Navegación, Geofísica, Cartografía, Fotogrametría, Geodesia, Geografía, etc.

Actualmente la Geomática es un término científico que hace referencia al conjunto de ciencias, en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica, también llamada información espacial o geoespacial. Por tanto, según la definición, la Geomática se preocupa de las mediciones, análisis, manejo, extracción y despliegue gráfico de datos espaciales relacionados con las características físicas de la Tierra.

En la actualidad la combinación de sensores y tecnologías como el escáner láser terrestre, los vehículos aéreos no tripulados (UAV), las cámaras digitales, los sensores inerciales o los propios GNSS, posibilitan la integración de datos y la obtención de resultados de gran potencial visual que, conservando el carácter métrico, están revolucionando las aplicaciones de reconstrucción 3D y los estudios multitemporales.

Algunas de las aplicaciones más importantes de la fotogrametría de objeto cercano son:

- Industria del automóvil, maquinaria industrial y construcción naval.
- Industria aeroespacial.
- Arquitectura, conservación del patrimonio y arqueología.
- Medicina y fisiología.
- Trabajos forenses.
- Ciencias naturales.
- Ingeniería Civil (medida de grandes estructuras, control y medida de deformaciones, medida de tuberías y túneles, minería, documentación de pruebas)

Así mismo, existe un gran número de trabajos y líneas de investigación relacionadas con el uso conjunto de fotogrametría y escáner láser terrestre, como son los dedicados a:

- Estudios de riesgos naturales
- Estudios medioambientales
- Estudios multitemporales de distinta índole

Dentro de los estudios multitemporales, para los que se emplean conjuntamente técnicas fotogramétricas y técnicas TLS, podemos destacar los relacionados con:

- deslizamientos
- movimiento e inestabilidad de laderas y taludes
- desprendimientos
- evoluciones de cauces
- línea de costa o masa forestal
- controles periódicos de deformabilidad (presas, puentes y viaductos, muros rígidos, escolleras, escombreras, y suelos de todo tipo).
- Etc.

Concretamente en este trabajo se emplearán técnicas fotogramétricas para el análisis de deformación de firmes de carretera. Así mismo se valorará la posibilidad de emplear técnicas de escáner láser terrestre (TLS).

Las ventajas de las técnicas geomáticas actuales es que son, generalmente, objetivas, rápidas y rentables, tanto en lo que se refiere a reducción de los tiempos de captura y procesamiento como en cuanto a la reducción de los costes asociados a la instrumentación y reducción de los trabajos de campo.

## **1.1. Estructura del TFG**

La memoria de este TFG se estructura en cuatro capítulos bien diferenciados, como se puede observar en el Figura 1.1. El primer capítulo es introductorio, incluyéndose en este los antecedentes y justificación del presente TFG, así como la estructura y objetivos del mismo. En el segundo capítulo se describe el proceso metodológico para alcanzar los objetivos planteados. En el tercer capítulo se desarrollará la aplicación práctica de dicha metodología. En el capítulo cuarto se exponen las conclusiones generales y resultados obtenidos en la realización del trabajo. En el apartado de bibliografía se recojen las fuentes consultadas para la redacción de dicho TFG.

Finalmente, en este documento se adjuntan una serie de anejos que apoyan y complementan este trabajo. Así mismo se incluyen los productos obtenidos (modelos digitales y ortofotografías) correspondientes a las distintas campañas realizadas para el presente TFG.

## Introducción

- Estructura
- Justificación
- Objetivos

## Proceso Metodológico

- Vehículos aéreos no tripulados (UAV)
- Escáner láser terrestre (TLS)
- Análisis multitemporal

## Aplicación Práctica

- Instrumental y software
- Situación y emplazamiento
- Selección del sistema de referencia
- Plataforma aérea no tripulada. Falcon 8
- Escáner láser terrestre.
- Estudio multitemporal

## Resultados y Conclusiones

- Control de la captura de datos
- Control del proceso de orientación
- Control de superficies
- Análisis del estudio multitemporal
- Análisis de viabilidad
- Conclusiones

## Bibliografía

## Anejos

## Productos. Modelos Digitales y Ortofotografías

Figura 1.1. Estructura del documento

## 1.2. Justificación

### 1.2.1. Justificación de la zona de estudio

El objeto o ámbito de estudio de este trabajo es el entorno de la carretera A-3200, que conecta Jaén con la Guardia y cuya longitud es de 7.850 km. El Grupo

de Investigación Sistemas Fotogramétricos y Topométricos (TEP-213) de la Universidad de Jaén, del que forman parte los tutores del presente TFG, dispone de datos previos con los que comparar y que permitirán, además, un análisis previo de la zona.

Como demuestran los datos previos, este tramo de la carretera JA-3200 ha sufrido incidencias, más o menos graves, en forma de grietas y movimientos en el pavimento de forma sistemática en periodos de lluvias desde hace algunos años y cuya dinámica se acentuó por las condiciones climatológicas reinantes en el invierno y primavera del año 2013, con numerosos periodos de fuertes lluvias prolongadas en el tiempo. Por tanto, el factor desencadenante más relevante es la precipitación durante la cual se produce un incremento importante de la presión intersticial, disminuyendo las presiones efectivas entre las partículas sólidas y alterando, por lo tanto, la estabilidad y resistencia del terreno.

El deterioro y/o deformación del firme está generando serios problemas, sobre todo a los usuarios asiduos de la carretera, incrementando sus gastos destinados al mantenimiento de los vehículos, aumento de los tiempos de recorrido o mayor incomodidad en la conducción que genera el mal estado superficial de las carreteras.

Las actuaciones efectuadas hasta la fecha han consistido, básicamente, en la reposición del pavimento y corrección local de algún talud. Actualmente, existe un interés mayor por la conservación y mantenimiento de las infraestructuras existentes que por la construcción de nuevas infraestructuras, como consecuencia de la situación económica de los últimos años. En este sentido, los estudios multitemporales están adquiriendo un papel importante en la planificación y toma de medidas preventivas y correctoras para el mantenimiento de infraestructuras, ya que permiten reconocer los mecanismos que gobiernan los procesos de inestabilidad y actuar consecuentemente sobre ellos para mitigarlos.

Estos estudios evolutivos o multitemporales consisten en el análisis de un fenómeno, proceso u objeto de interés, en diferentes instantes o campañas temporales, con el objetivo de obtener información sobre el estado, la evolución o el comportamiento del mismo.

Por tanto, este TFG pasará por la realización de un estudio multitemporal que nos permitirá analizar y obtener información sobre el estado pasado y actual del firme. Para este fin se recurrirá a la fotogrametría. Así mismo se valorará la viabilidad de empleo de otra técnica geomática como es el escáner láser terrestre o TLS (Terrestrial Laser Scanning).

### **1.2.2. Justificación de las metodologías empleadas**

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) la fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiel acerca de objetos físicos y su entorno a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos. Esta es una técnica sin contacto, de rápida ejecución y con una gran cantidad de información obtenida en poco tiempo.

La fotogrametría aérea es aquella que utiliza fotografías tomadas desde una cámara aerotransportada, pero este tipo de vuelos se producen a una gran altitud y con rangos de escalas fuera de los parámetros necesarios (denominadas escalas medias y pequeñas), más dirigidos a la producción de cartografía.

Con la aparición de los sistemas aéreos no tripulados o UAV (Unmanned Aerial Vehicle), se abre un horizonte muy prometedor para la fotogrametría en esta línea de trabajo, aproximando la fotogrametría aérea clásica a lo que normalmente se denomina fotogrametría de objeto cercano o close range photogrammetry (más acorde quizás con el objeto de estudio de este trabajo y con el instrumental no métrico empleado).

Así mismo, la toma de fotografías desde un UAV nos ofrece mayores posibilidades en la toma de datos en áreas de pequeña a mediana extensión donde no es efectiva la fotogrametría aérea convencional. Así, podremos realizar fotografías cercanas con una resolución mayor que nos darán como resultado modelos tridimensionales de un gran detalle y precisión sin perder la información semántica de la propia imagen.

Por otro lado, el escáner láser terrestre (TLS) es una tecnología que permite la obtención de datos topográficos a una resolución y rapidez sin precedentes, generándose, a partir de las nubes de puntos adquiridas por el dispositivo, modelos de superficie de gran detalle y fiabilidad.

En la Figura 1.2 se observan los distintos métodos existentes para la captura de datos y su relación con la precisión y el tamaño del objeto, destacándose en color amarillo los dos métodos a emplear en el presente TFG.

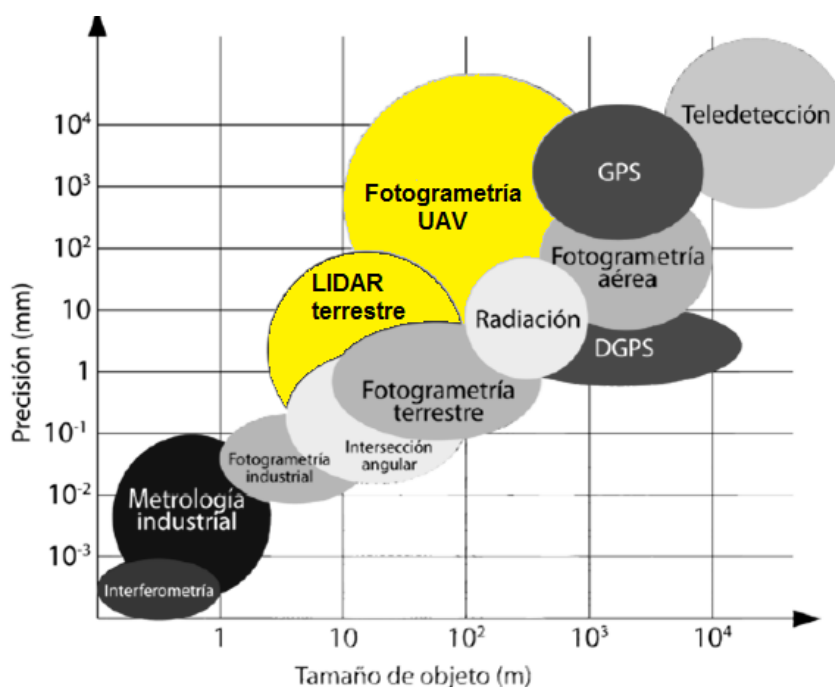


Figura 1.2. Gráfico que relaciona métodos con precisión y tamaño del objeto. Adaptado de [1]

Por tanto, la idoneidad del empleo de ambas técnicas (UAV y TLS) para este tipo de trabajos queda justificada por el bajo coste y el reducido tiempo de adquisición de datos, así como la consonancia entre las precisiones, alcanzadas por ambas técnicas, y las dimensiones del objeto o área de estudio, como más adelante se demostrará.

### 1.3. Objetivos

El objetivo principal de este TFG es determinar la viabilidad del empleo de UAV y técnicas de fotogrametría para estimar la deformación horizontal y vertical en firmes de carretera causada por procesos de inestabilidad de ladera.

Con este fin, se planteará dos campañas de campo que cubran todos los aspectos necesarios para orientar un vuelo fotogramétrico y obtener un MDE de detalle, así como una ortoimagen de la zona de interés.

Estas campañas se realizarán en una zona próxima al núcleo urbano de La Guardia de Jaén, en el entorno de la carretera A-3200, en la que se han identificado importantes movimientos de ladera, cómo se ha explicado en el apartado 1.2.

Los datos recabados se compararán con una campaña anterior (cuyos datos han sido proporcionados por el Grupo de Investigación: Sistemas Fotogramétricos y Topométricos), de forma que se pueda establecer una comparación del firme de la carretera.

Existe una relación directa entre la “resolución temporal” y el tipo de fenómeno, proceso u objeto estudiado. Y de la misma manera, existe una relación directa entre la precisión y densidad de la información requerida y la magnitud de la evolución o alteración que se pretende discernir con este estudio. [2]

Además, se evaluará la posibilidad de emplear técnicas de TLS, que en caso de ser viable permitirá una fuente adicional para el análisis y la fusión e integración de datos.

También, se analizará la viabilidad y rentabilidad del método, así como sus límites de aplicación.

Finalmente con este Trabajo Fin de Grado se pretende cubrir uno de sus objetivos principales, como es la realización de un trabajo en el ámbito de las tecnologías específicas de la Geomática y de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en estas enseñanzas,

especialmente las relativas al diseño y materialización de redes de apoyo mediante GNSS, planificación y ejecución de vuelos fotogramétricos, aplicaciones de técnicas de fotogrametría y aplicaciones no cartográficas, así como la monitorización de deformaciones.

Todos estos hechos justifican la realización del este Trabajo Fin de Grado.

## Capítulo 2

---



## 2. Proceso metodológico

En este capítulo se presentará el proceso metodológico propuesto para cada una de las técnicas empleadas en el presente TFG, siendo estas las técnicas UAV y TLS.

De esta manera, el presente capítulo queda subdividido en 3 apartados. En el primero se describe la metodología de trabajo para técnicas fotogramétricas mediante el empleo de dispositivos UAV para la captura de la información. Se presenta cada una de las etapas del proceso fotogramétrico, desde la planificación hasta la obtención de los productos (ortofotografías y modelos digitales).

En el segundo apartado se presenta el método de trabajo planteado para técnicas TLS, comprendiendo básicamente las mismas etapas que la metodología anterior.

Finalmente, el tercer apartado muestra la metodología empleada para realizar el análisis multitemporal, que es el objetivo último de este TFG.

Los apartados de los que se compone este capítulo se recogen en la Figura 2.1.

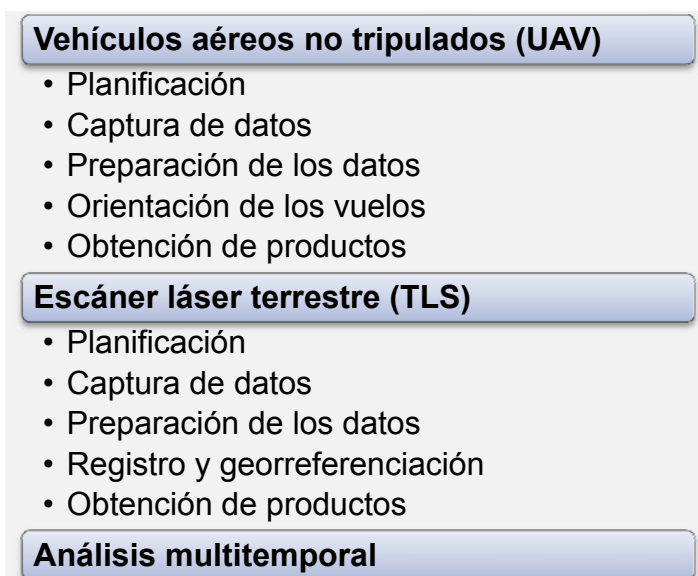


Figura 2.1. Proceso Metodológico

## 2.1. Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Desde la llegada de la fotogrametría digital en la década de los 90, uno de los rasgos más notables ha sido su rápida expansión gracias a la posibilidad de desarrollar líneas de bajo coste al alcance de un mayor tipo de usuarios. Actualmente, una de estas posibilidades pasa por el empleo de plataformas aéreas no tripuladas de bajo coste. El rápido desarrollo y la innovación en sistemas, miniaturización de los equipos, desarrollo de nuevas herramientas de procesamiento basadas en algoritmos de visión por ordenador, etc., ha hecho que los UAV estén comenzando una nueva revolución en el campo de la geomática y más concretamente de la fotogrametría.

Conforme a las definiciones internacionales un UAV es un vehículo aéreo propulsado que no lleva personal como operador a bordo. Se denominan con diferentes términos, por lo general sinónimos:

- Unmanned aerial vehicles/systems (UAV/UAS)
- Remotely piloted vehicles/aircraft (RPV/RPA)
- Unmanned vehicle systems (UVS)

Dentro de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) nos interesan sólo aquellos vehículos controlables en los tres ejes y que, además, sea:

- Capaz de mantenerse en vuelo por medios aerodinámicos.
- Pilotado de forma remota o incluye un programa de vuelo automático.
- Reutilizable.
- No esté clasificado como un arma guiada o un dispositivo similar de un solo uso diseñado para el lanzamiento de armas.

### **Normativa Vigente**

Para garantizar una transición progresiva y un alto nivel de seguridad de la aviación civil, es necesario establecer el régimen jurídico específico aplicable a estas aeronaves y a las actividades aéreas desarrolladas por ellas. De esta manera, en España se ha producido una reciente regulación del sector, la cual

presenta un marcado carácter urgente y provisional. Las principales disposiciones legales para sistemas de 2-25 kg son [3]:

- Todas las aeronaves civiles pilotadas por control remoto (RPA) deberán llevar una placa de identificación.
- RPAs de masa máxima al despegue de 2-25 kg sólo pueden operar fuera de aglomeraciones de urbanas y de reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, dentro del alcance visual del piloto, a una distancia < 500 m (o mayor distancia si se dispone de la certificación adecuada) y a una altura sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m).

Requisitos para poder operar (principalmente):

- Disponer de manual de operaciones.
- Estudio aeronáutico de seguridad. Póliza de seguros para responsabilidad civil frente a terceros.

El piloto debe cumplir los requisitos del RD:

- Ser titular de cualquier licencia de piloto o disponer de un certificado para el pilotaje de RPAs emitido por una organización autorizada.
- Mínimo 18 años.
- Certificado médico
- Documento que acredite los conocimientos de pilotaje (emitido por el fabricante u organización autorizada).

### **Elementos del sistema UAV**

Los elementos individuales que comprende el sistema son:

- Estación de control. Sistema que se encarga del pilotaje de la aeronave de forma remota. Esta estación de control puede constar de una estación base (ordenador) con capacidad para autopilotaje y de un sistema de control remoto que permitirá el control manual del

aparato. Estos sistemas se pueden presentar por separado o de manera integrada.

- Aeronave, UAV o RPA (Remotely Piloted Aircraft). Debido al gran número de modelos y variantes que hay actualmente de UAV en el mercado (sistemas de ala fija, helicópteros, multirrotores con diferentes configuraciones, etc.), no existe una lista de equipos y accesorios mínimos de los que deben equipar un UAV. No obstante, existen una serie de elementos que sí suelen ser habituales en los equipos disponibles para uso civil y más concretamente en aplicaciones geomáticas. Estos son:
  - Unidad Trans-receptora. Emisor-receptor utilizado para la transmisión de información entre la aeronave y la estación de control en tierra.
  - Unidad de control central. Encargada de realizar el procesamiento de todos los datos que recibe la aeronave (datos de control en tierra y de los diferentes sensores instalados en la misma).
  - Sistema GNSS. Este sistema basado en el posicionamiento y la navegación por satélite, permite a la aeronave situarse en posiciones deseadas o indicar la posición en la que se encuentra en todo momento en tiempo real.
  - Unidad de medición inercial. Tiene como función determinar la posición y actitud (orientación) de la aeronave en todo momento. Para ello mide las fuerzas inerciales que se producen en la aeronave mediante el uso de acelerómetros, normalmente un mínimo de tres.
  - Sistema de memoria interna. Estos sistemas de almacenamiento guardan los datos de navegación y de vuelo.
  - Sistema de vídeo en directo. Proporcionan una visión en tiempo real de las inmediaciones de la aeronave.

El vuelo de estos dispositivos es autónomo pero ha de estar supervisado por personal en tierra quién comprobará parámetros como velocidad, altitud o

distancias recorridas en todo momento, manteniendo siempre el contacto visual. Además de la supervisión desde tierra, estos sistemas deben seguir un plan de vuelo previamente diseñado en gabinete cuando se desea cumplir una cierta precisión y cubrir una determinada área de trabajo de forma completa.

### **2.1.1. Planificación**

La planificación de la captura de datos mediante el dispositivo UAV requiere el estudio y diseño tanto del vuelo fotogramétrico como del apoyo topográfico para dicho vuelo, así como de las características del propio UAV.

#### *2.1.1.1. Planificación del vuelo*

Se llama proyecto de vuelo al conjunto de cálculos previos a la realización de un vuelo fotográfico, con el objetivo de conseguir el fin propuesto, bajo unas condiciones establecidas previamente. [4]

En la fase de planificación de un vuelo fotogramétrico se debe definir la tipología y características de los sensores a emplear así como los condicionantes técnicos y ambientales durante la realización del mismo. Los parámetros a definir en un vuelo fotogramétrico son los siguientes: [5]

- Ámbito de actuación: Determinación exacta del área geográfica donde se realizarán los trabajos.
- Sistema: Elección de sensor o sensores a emplear.
- Resolución espacial: En función de los objetivos del vuelo fotogramétrico, de las limitaciones en la identificación y/o interpretación de fenómenos y del sensor empleado se definirá la escala del vuelo y/o el tamaño de GSD.
- Configuración del vuelo: Elección de una configuración de tomas convergentes, estereoscópicas clásicas (como la utilizada en el presente TFG) o configuración mixta (tomas clásicas junto a convergentes). Además, se definirán los ejes de vuelo de cada una de

las pasadas y se determinará la localización de cada uno de los centros de proyección (CDP) en cada una de las pasadas.

- Condiciones ambientales y temporales: Fecha, horario y condiciones meteorológicas de realización del vuelo.

Partiendo del caso ideal, en el que el avión recorre a una altura H' el terreno a levantar, disparando el obturador de la cámara a intervalos regulares de tiempo de manera que cada dos fotografías se dispone del recubrimiento adecuado, y se distribuyen sus pasadas sobre el terreno en trayectorias paralelas, se pueden definir los parámetros y relaciones recogidas en la Tabla 2.1:

<b>Escala del fotograma</b>	$M_b = \frac{1}{mb} = \frac{f}{D}$	<i>M<sub>b</sub>: Escala del fotograma</i> <i>m<sub>b</sub>: denominador de la escala</i>
<b>Tamaño GSD</b>	$GSD = \frac{D}{f} \cdot res$	<i>GSD: tamaño del pixel en el terreno</i> <i>res: resolución de la cámara</i>
<b>Recubrimiento longitudinal</b>	$p\% = \frac{(Lt_{Hz} - b) \cdot 100}{Lt_{Hz}}$	<i>f: focal</i>  <i>D: Altura de vuelo sobre el terreno</i> <i>* en tomas centiales la altura de vuelo coincide con la distancia de disparo (H)</i>
<b>Base aérea</b>	<b>Fotobase</b> $b = Lt_{Hz} \cdot \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$ <b>Base</b> $B = b \cdot mb = Lt_{Hz} \cdot \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$	<i>p: recubrimiento longitudinal</i>  <i>q:: recubrimiento transversal</i>
<b>Recubrimiento transversal</b>	$q\% = \frac{(Lt_v - a) \cdot 100}{Lt_v}$	<i>Lt<sub>Hz</sub>: lado del fotograma en el terrero (ancho)</i>  <i>Lt<sub>v</sub>: lado del fotograma en el terreno (alto)</i>
<b>Distancia entre pasadas</b>	$a = Lt_v \cdot \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$ $A = Lt_v \cdot \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$	<i>lt<sub>Hz</sub>: lado del fotograma (ancho)</i> <i>lt<sub>v</sub>: lado del fotograma (alto)</i> <i>B: base aérea</i>
<b>Número de fotografías por pasada</b>	$num_{fot} = \frac{ancho}{B} + 1$	<i>A: separación entre pasadas</i> <i>b: base fotográfica</i>
<b>Número de pasadas</b>	$num_{pasadas} = \frac{alto - Lt_v}{A} + 1$	<i>alto, ancho: dimensiones de la zona</i> <i>Num<sub>pasadas</sub>: n° de pasadas</i>
<b>Número de fotografías</b>	$num_{total} = num_{fot} \cdot num_{pasadas}$	<i>Num<sub>fot</sub>: n° fotografías por pasada</i> <i>Num<sub>total</sub>: n° total de fotografías</i>

Tabla 2.1. Parámetros del plan de vuelo

Para terreno accidentado se deben realizar exposiciones variables en función del perfil del terreno a lo largo del eje de vuelo, ya que si adoptamos una altura de vuelo constante sin tener en cuenta las variaciones topográficas se tendrán recubrimientos insuficientes en las partes altas y excesivos en las bajas. Dada las bajas alturas de vuelo habituales con los UAV, las variaciones del relieve son más críticas que en el caso de fotogrametría aérea convencional. [5]

#### *2.1.1.2. Planificación del Apoyo Topográfico*

El objetivo del apoyo topográfico es la obtención de las coordenadas de un conjunto de puntos distribuidos sobre la zona cubierta por el vuelo fotogramétrico, que permiten la determinación de la orientación absoluta del conjunto de fotogramas o fotografías que componen dicho vuelo. A pesar de que la mayor parte de los sistemas UAV ligeros actuales disponen de sistemas de posicionamiento e inerciales, estos sistemas no suelen garantizar una precisión tal que permitan el empleo de orientación directa. Por ello aún es necesario el empleo de puntos de control medidos sobre el terreno con técnicas convencionales para garantizar la precisión de los productos finales.

Los trabajos de planificación comienzan con la recopilación de toda aquella información necesaria para una correcta evaluación, análisis y determinación de las necesidades de los trabajos a desarrollar: [6]

- Delimitación del área de vuelo.
- Gráfico de vuelo donde se incluya la traza de las pasadas y las huellas de los fotogramas.
- Cartografía oficial de la zona de trabajo.
- Sensores previstos en la realización del vuelo.
- Calidad de los CDP (Calidad de las coordenadas y de los datos inerciales registrados en vuelo).
- Tamaño del GSD del vuelo.
- Exactitud y precisión posicional requerida del apoyo topográfico.
- Configuración de la red geodésica existente en la zona de trabajo.

La planificación de los trabajos se realizará siempre teniendo en cuenta el empleo de equipos GNSS bifrecuencia; siendo el observable la fase, modo de posicionamiento relativo, técnica de observación estática o estática rápida y momento de obtención de coordenadas a posteriori mediante procesado de las observaciones.

### **Características y Distribución de puntos de control (PC)**

El número y localización de PCs tiene que realizarse teniendo en cuenta el modo de cálculo de los parámetros de orientación externa, el empleo o no de sensores de navegación en vuelo y de la forma del vuelo.

Los requisitos principales que ha de cumplir un PC son los expuestos a continuación [6]

- Cubrir completamente la zona de trabajo no permitiendo extrapolaciones en la determinación de coordenadas fuera de dicha zona y la red de trabajo debe estar acorde con las distribuciones de PCs en bloques de fotogrametría aérea convencional. [7]
- Aparecer en el mayor número posible de fotogramas.
- Ser perfectamente identificable en todos los fotogramas, ubicándose preferentemente sobre un detalle artificial y estable en el terreno.
- Quedar definido por intersecciones de alineaciones rectas, tales como esquinas de corrales, esquinas de casas, albercas, etc. En ningún caso la localización de un PC se tiene que prestar a interpretación, excluyendo manchas del terreno, intersecciones de caminos, etc.
- Presentar una incertidumbre planimétrica menor que el tamaño nominal del píxel del vuelo empleado.
- En el caso de utilizar técnicas GNSS, estos han de estar sobre un entorno donde no exista efecto multicamino y no aparezcan alteraciones en el campo electromagnético, tales como proximidades de antenas de telecomunicaciones o líneas eléctricas, que puedan alterar la recepción de la señal GNSS

- En cuanto a los puntos alimétricos es conveniente escogerlos sobre partes del terreno con pendiente muy suave, lo más horizontal posible, evitando localizaciones que se presten a una mal posado estereoscópico tales como arenas.

### Diseño de marcas para medidas automáticas

Los puntos se pueden materializar sobre el terreno mediante unas marcas o targets, siendo necesario determinar su tamaño de manera que sean claramente identificables en todas las imágenes y se puedan medir con precisión.

En primer lugar se calcula el diámetro de la marca en el plano imagen y en el plano objeto mediante las siguientes fórmulas, que pueden deducirse a partir de la Figura 2.2.

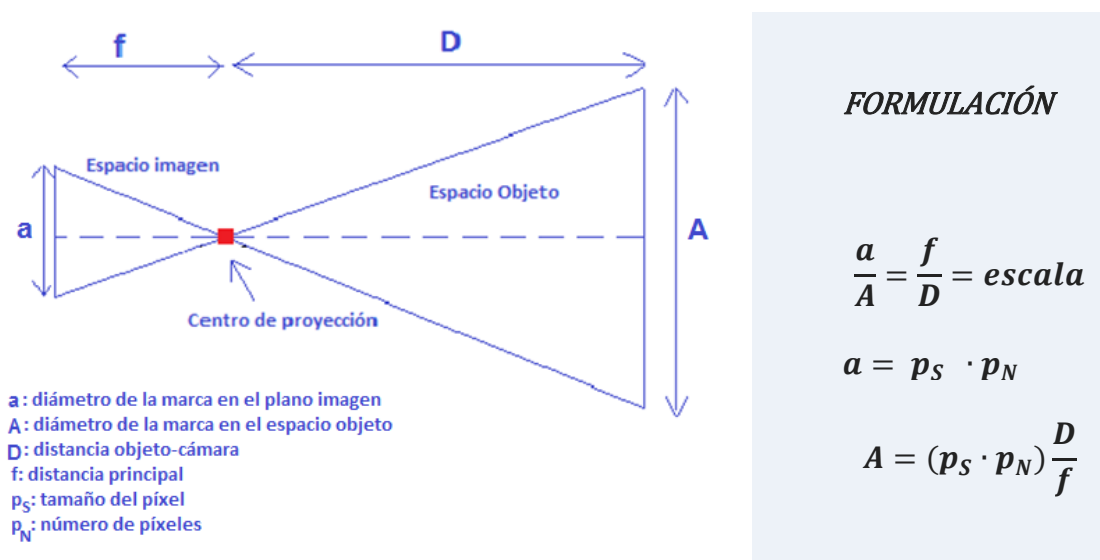


Figura 2.2. Croquis explicativo y fórmulas para el diseño de marcas

Tanto la medida manual como automática de la marca requiere un tamaño mínimo para poderla medir con fiabilidad. Para la mayor parte de aplicaciones prácticas es necesario que la marca ocupe en la imagen un diámetro de al menos 5 píxeles, por lo que el diámetro mínimo de la marca se puede estimar mediante la expresión siguiente:

$$A \geq (5 \cdot p_S) \frac{D}{f}$$

A partir del diámetro de la marca en el espacio objeto ( $A$ ) podemos calcular el área que encierra a este círculo ( $S = \pi \cdot R^2$ ;  $R = A/2$ ). Por tanto, la longitud del lado del cuadrado que encierra un círculo de diámetro  $A$  y área  $S$  es  $L = \sqrt{S}$

## 2.1.2. Captura de datos

### 2.1.2.1. Ejecución del vuelo

Existen varios modos de vuelo, siendo estos los siguientes:

- Modo de vuelo manual: el piloto (con o sin ayudante) por control remoto controla todas las operaciones de vuelo en sí y la adquisición de las imágenes.
- Modo de vuelo asistido o semi-automático: el piloto controla el vuelo (puede guiar su dirección y variaciones de altitud) pero el UAV se estabiliza con su posición GNSS o bien con su altura barométrica.
- Modo de vuelo autónomo: pilotaje totalmente automático en el cual se ejecuta la misión de vuelo según un proyecto predefinido. Siempre queda la opción de tomar el control desde tierra.

Así mismo, podemos distinguir tres modos de adquisición de imágenes:

- Modo manual: el operador dispara la cámara, para lo que se requiere visión directa y transmisión de la señal de vídeo directamente desde la cámara o desde otra cámara auxiliar.
- Modo parada (stop): el UAV, vuela a un punto de disparo predefinido (way point) y planea sobre ese punto (asistido por el sistema GNSS). Se indica un intervalo de tolerancia (en m) y el tiempo (en s) en que debe tomarse la imagen. Este modo permite tomar la imagen con precisión (dada por el sistema GNSS y la estabilidad del UAV) en el punto exacto, pero consume tiempo de vuelo.
- Modo en vuelo (cruising): las imágenes se toman en vuelo sin que el UAV pare. La adquisición se regula por la velocidad y por intervalos de tiempo. El sistema es eficiente para áreas extensas, pero la

calidad de la geometría del vuelo dependerá de la estabilidad del sistema y de la plataforma que estabiliza la cámara. [8]

#### *2.1.2.2. Apoyo Topográfico*

Los puntos a observar en campo se elegirán dentro de las áreas delimitadas en la fase de planificación.

Al inicio de cada jornada de campo es aconsejable consultar el estado del servicio de las antenas de referencia GNSS empleadas, garantizando que los tiempos de observación sean los adecuados según las distancias de línea base estimadas en la fase de planificación.

Las condiciones de observación definidas para un PC son:

- Número de satélites superior o igual a 5.
- Precisión GDOP inferior a 5.
- Máscara de elevación superior a 15°.
- Registro de épocas igual a un segundo.

#### **2.1.3. Preparación de los datos: procesado de observaciones GNSS.**

Se deben procesar en primer lugar aquellas líneas base correspondientes a las bases empleadas como densificación de la red de antenas de referencia GNSS. En segundo lugar, todas las líneas base existentes entre los PC observados y los puntos tomados como referencia, antenas de referencia y bases de densificación. En ningún caso las coordenadas de un PC se calculan a partir de otro PC. [9]

## 2.1.4. Orientación de los vuelos

### 2.1.4.1. Orientación Interna

Con la orientación interna se calculan los parámetros de transformación para pasar las coordenadas sobre la imagen a un sistema tridimensional con origen en el centro de proyección de la cámara ( Figura 2.3).

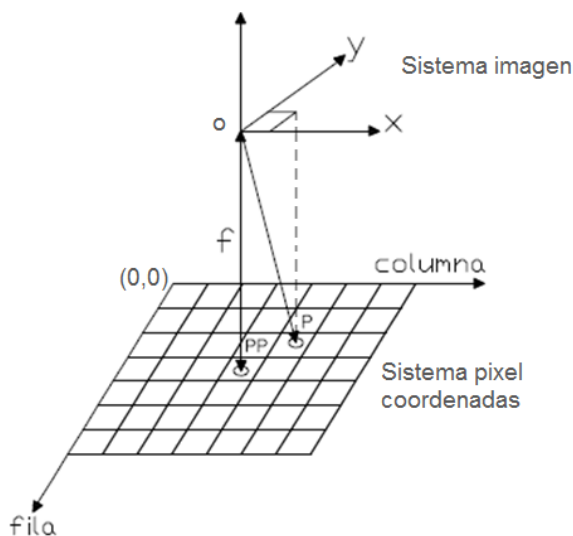


Figura 2.3. Orientación interna digital. Adaptación de [4]

Tenemos por lo tanto dos sistemas de coordenadas: el sistema imagen, tridimensional, y el sistema píxel, bidimensional.

Llamando :

- PP= punto principal
- f= distancia focal

Para llevar a cabo tal proceso es necesario conocer los datos de la geometría interna de la cámara, disponibles normalmente en el certificado de calibración de la misma.

En caso de imágenes tomadas con cámara digital, la transformación del sistema píxel (Columna, Fila) al sistema imagen  $(x_p, y_p, z_p)$  es la siguiente:

$$x_p = (C_{px} - C_o) r_x$$

$$y_p = (F_{px} - F_o) r_y$$

$$Z_p = (-f)$$

Siendo:

- $x_p, y_p, Z_p$  = coordenadas de p en el sistema imagen
- $C_{px}, F_{px}$  = coordenadas píxel (columna, fila) de p.
- $C_o, F_o$  = origen coordenadas píxel
- $r_x, r_y$  = resolución o tamaño del píxel en micras.

#### 2.1.4.2. Orientación externa

Consiste en la reconstrucción de la posición y orientación del haz perspectivo respecto del objeto. Esta reconstrucción puede hacerse en uno o dos pasos. Dado que el software empleado en el presente TFG para la orientación del vuelo (Agisoft PhotoScan) utiliza un método de orientación basado en el método en dos pasos, este será explicado a continuación.

El método orientación en dos pasos, obtiene primero los elementos de orientación relativa entre sí de las diferentes imágenes que constituyen el bloque. La orientación relativa del bloque se realiza a partir de la identificación de puntos homólogos en las diferentes imágenes mediante procedimientos de correlación (matching) y seguidamente se realiza la orientación absoluta del bloque mediante una transformación espacial de semejanza. La orientación absoluta realiza el paso del sistema de referencia arbitrario al sistema de referencia final mediante siete parámetros que definen una traslación al origen, la orientación angular y el cambio de escala. Para realizar tal transformación es necesario disponer de puntos de control conocidos en ambos sistemas (arbitrario y final) que permitan establecer dicha relación entre el espacio modelo y espacio objeto.

### 2.1.5. Obtención de los MDE y las Ortofotografías

La Fotogrametría Digital ha supuesto, en los últimos años, uno de los avances más relevantes en la obtención de productos cartográficos.

- **Modelos Digitales del Terreno (MDT).** La obtención del MDT se basa en la determinación de paralajes entre imágenes homólogas de un modelo estereoscópico. Para su definición se requieren una malla de puntos y elementos lineales (líneas de rotura, cambios de pendientes) y superficiales (exclusión de zonas, áreas de altura constante). Los MDT pueden extraerse automáticamente mediante correlación de imágenes.
- **Ortoimágenes.** Una ortoimagen es una imagen digital transformada que muestra en proyección ortogonal la escena fotografiada. Consiste en el paso de una proyección perspectiva a la ortogonal, mediante un proceso denominado rectificación diferencial, que elimina el desplazamiento producido por la inclinación de la imagen fotográfica y por el efecto orográfico.

La producción de ortoimágenes convencionales precisa de un modelo digital y se obtiene mediante la aplicación de las ecuaciones de colinealidad, que utilizan como coordenadas objeto/terreno los centros que se obtienen al proyectar una retícula sobre el MD y el valor radiométrico del píxel de la imagen de salida que se obtiene de la imagen de entrada.

## 2.2. Escáner láser terrestre (TLS)

El Escáner Láser Terrestre (TLS) es un dispositivo fijo en tierra que utiliza un láser para medir las coordenadas tridimensionales de una región determinada de la superficie de un objeto de forma automática, en un orden sistemático a una alta velocidad en tiempo casi real.[10]

La Figura 2.4 muestra el proceso metodológico propuesto para el trabajo con TLS:

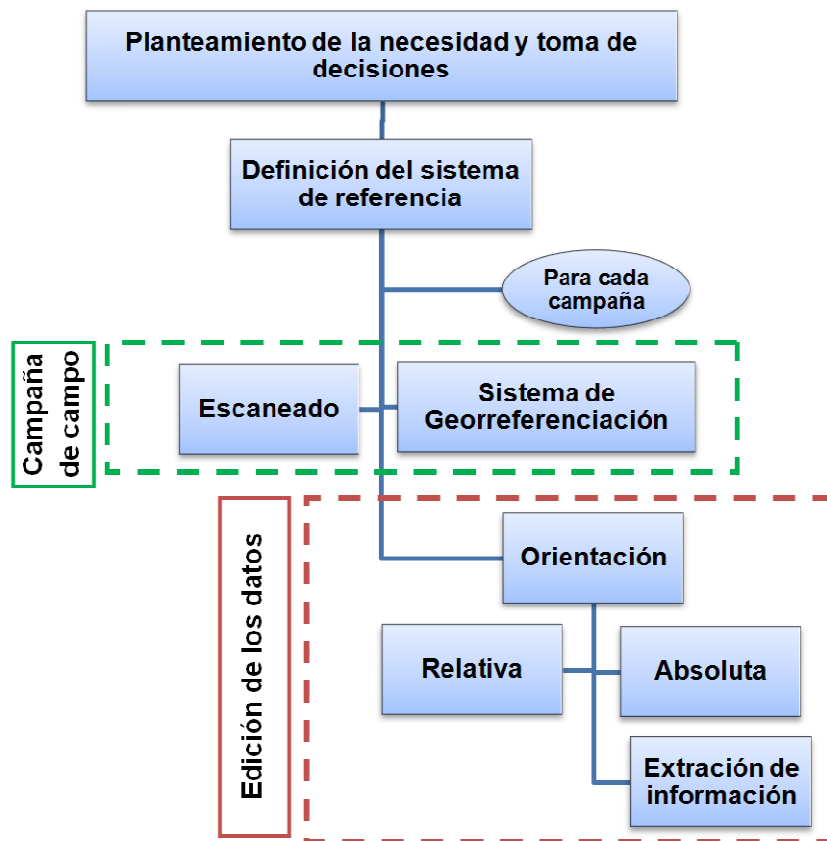


Figura 2.4. Metodología de trabajo TLS.

El escáner láser o LiDAR terrestre realiza el barrido de la zona a estudiar mediante un haz de luz láser desde una estación en tierra. De ahí que esta técnica también se conozca como “Ground Based Lidar Technology“. Este dispositivo, provisto de un láser, mide ángulos, distancias e intensidad de los puntos iluminados, de manera sistemática, a una tasa elevada y en tiempos reales. El resultado es una nube de puntos 3D que representa el modelo escaneado. [11]

La técnica se caracteriza por una alta densidad de medidas con gran precisión y exactitud, y hace posible la exploración de toda una superficie escaneada. Lo único que se precisa es el propio escáner láser y un instrumento de referencia que permita obtener coordenadas absolutas, generalmente un sistema GNSS, aunque se puede llegar a prescindir de este y trabajar en coordenadas locales.

### 2.2.1. Planificación

La planificación de un escaneado láser terrestre debe determinar los objetivos a cumplir y productos a entregar, definir las técnicas de medición y equipamiento así como los condicionantes técnicos.

De momento no hay ningún proceso estándar para la planificación de un escaneado láser terrestre. Sin embargo, la planificación debe contener, como mínimo, los siguientes puntos: [12]

- Análisis del área a levantar.
- Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser y de los puntos de referencia.
- Gestión de los datos.

#### *2.2.1.1. Análisis del área a levantar*

Recopilar cuanta más información sobre el objeto o fenómeno a documentar nos da una idea de la complejidad y del tiempo necesario para llevar a cabo la tarea. Así mismo, es importante el estudio del entorno de trabajo, ya que nos puede limitar los posibles estacionamientos del TLS. Indirectamente, los emplazamientos posibles del escáner láser determinarán el alcance máximo y mínimo que el escáner láser debe cumplir.

#### *2.2.1.2. Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser*

Una vez recopilada la información del sitio a documentar hay que planificar el emplazamiento del equipo escáner láser, así como los puntos de control.

La siguiente lista proporciona un conjunto de reglas prioritarias a tener en cuenta cuando se determina la posición óptima del escáner.

- Comprobar que las estaciones cubren la mayor área posible sin obstáculos en la línea de visión y que se producen las menos sombras posibles.
- Comprobar que se cumplen los alcances mínimo y máximo para alcanzar la precisión requerida.
- Minimizar la aparición de pequeños ángulos de incidencia. Con ángulos muy agudos el haz láser no se refleja de forma óptima, por lo que la precisión del escáner es menor.
- Intentar reducir el número de estacionamientos
- Es necesario garantizar los solapes y la geometría de intersección entre los escaneos para poder unir las diferentes nubes de puntos con precisión y fiabilidad en la fase de procesamiento.

Otros factores importantes que hay que tener en cuenta son:

- Seguridad y salud.
- El entorno y las condiciones ambientales (vibraciones, temperatura exterior, viento...).
- Elevación del escáner sobre el suelo.
- Dificultades de accesibilidad a la zona de estudio
- Número de baterías y duración de las mismas.
- Visibilidad de los puntos de referencia artificial o natural. [12]

#### *2.2.1.3. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de control*

Los puntos de control se usan principalmente para el registro (también conocido como orientación o alineación; Apartado 2.2.4.) de los escaneos realizados desde diferentes posiciones.

Algunas configuraciones de las dianas no producen una solución única cuando se realiza el registro. Por ejemplo, si todas las dianas están en una línea, tenemos un grado de libertad, la rotación en torno a esa línea. Como consecuencia de lo anterior, uno de los puntos más importantes cuando se utilizan las dianas es que tienen que estar repartidas lo más ampliamente posible

sobre la escena, no sólo en las direcciones de los ejes X e Y, sino también en la dirección del eje Z.

*Mills and Barber (2006)* [10] establecen que, dependiendo de la técnica de registro empleada, debe haber al menos 4 puntos de referencia/dianas bien distribuidas en cada escaneado.

#### *2.2.1.4. Gestión de los datos*

Es importante reflexionar acerca del volumen de almacenamiento de los datos antes de empezar a escanear.

Una vez finalizadas estas tareas, se debe realizar un croquis que describa los objetos escaneados, las posiciones de las dianas numeradas y los estacionamientos del escáner, así como condiciones externas específicas que puedan influenciar el escaneado y los ajustes.

### **2.2.2. Captura de datos**

#### *2.2.2.1. Resolución*

La cuestión clave cuando se utiliza un escáner láser es elegir la correcta resolución. La resolución se define como la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, y de esta manera determina la densidad de puntos de la nube.

En vista de lo anterior, la resolución queda determinada por el detalle de menor tamaño que se necesita reconocer en el resultado final. Por tanto, está directamente relacionado con la escala del resultado.

Se debe tener presente que escaneando con una resolución mayor que la precisión de cada punto se puede producir un muestreo excesivo que resulta en más ruido en el conjunto de datos final.

Como la mayoría de los escáneres trabajan con un ángulo constante entre dos puntos consecutivos (basado en coordenadas polares), la resolución del escáner estará definida para una cierta distancia al escáner.

Además de tener en cuenta la distancia de escaneo, a la hora de determinar la resolución óptima, hay que considerar los solapes a utilizar, dado que en estos se podría hasta duplicar la densidad de los datos.

#### *2.2.2.2. Escaneado del objeto de estudio*

Una vez se ha determinado el campo de visión y se ha fijado la resolución más adecuada, se puede empezar a escanear. El proceso de escaneo es totalmente automático.

Según la resolución elegida y el tamaño del área escaneada, el proceso de escaneado puede durar desde pocos minutos hasta algunas horas. La velocidad de captura dependerá del propio instrumento y debe venir recogida en las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante.

#### *2.2.2.3. Comprobación de la captura de datos*

Es muy importante comprobar in-situ una vez finalizado el escaneo que este se haya realizado con éxito.

### **2.2.3. Preparación de los datos**

El resultado del escaneo a través del TLS es un conjunto de puntos generalmente llamado “nube de puntos”, cuya definición fue propuesta por el Dr Jon Mills y David Barberen (2006) [10], *“la nube de puntos es un conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de referencia común, que le muestra al espectador una comprensión de la distribución espacial de un objeto en el sitio. También se puede incluir información adicional como un valor de intensidad o un valor RGB”*.

El formato en que se almacena la nube de puntos depende del software del fabricante; algunos formatos solo contienen la información de las coordenadas XYZ del punto, mientras que otros, además de las coordenadas, contienen otro tipo de información como el porcentaje de intensidad del pulso láser, el valor del vector normal de cada punto y la posición del escáner, entre otros. Los formatos

más comunes para el almacenamiento de nube de puntos son: XYZ, PTX, PTS, XYZRGB, LAS y FLS.

#### **2.2.4. Registro y georreferenciación**

En la mayoría de casos, el objeto a escanear es demasiado grande para ser escaneado desde un única posición o bien hay oclusiones. Por tanto, el objeto se escanea desde varias estaciones de medición para obtener información de todos los lados del objeto, de tal manera que haya cierto solapamiento entre las nubes de puntos generadas en cada estación. Los datos registrados en una estación son, en la técnica TLS, normalmente conocidos como “scan”. [7]

Cada una de las nubes de puntos obtenidas desde diferentes estaciones, está contenida en el sistema de coordenadas propio de cada posición de escaneo. Estos escaneos tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante, un proceso que se llama alineación, orientación o registro, que consiste en la orientación relativa entre sí de las diferentes nubes de puntos y las estaciones de escaneo. Seleccionando una de las estaciones como referencia, se transforman las otras nubes de puntos y estaciones a un único sistema y se genera una única nube de puntos global.

Directamente vinculado con la alineación, o registro, se encuentra la georreferenciación de todo el conjunto de datos. La georreferenciación consiste en la orientación absoluta de las nubes y las estaciones a un sistema de coordenadas definido. Esto puede hacerse mediante registro directo (con el empleo de sensores externos para posicionamiento de la nube de puntos) o indirecto (con el uso de puntos de control) [12].

#### **2.2.5. Obtención de productos: MDE**

El procesamiento de una nube de puntos hace referencia a la transformación de la nube de puntos bruta registrada en un resultado final. Este resultado final puede adoptar varios formatos: nube de puntos limpiada, planos 2D estándar

(elevaciones, secciones transversales, etc), modelos 3D, texturizados o no, para animaciones y navegación, etc.

Uno de los productos más importantes que se pueden obtener con los datos procedentes de escáner láser, es la generación de modelos digitales mediante triangulación de la nube de puntos capturada y filtrada.

### **2.3. Análisis multitemporal.**

Los estudios evolutivos o multitemporales consisten en el análisis de un fenómeno, proceso u objeto de interés, en diferentes instantes o campañas temporales, con el objetivo de obtener información sobre el estado, la evolución o el comportamiento del mismo a lo largo del tiempo. [2]

#### **2.3.1. Planificación**

Entre los aspectos a tener en cuenta para la planificación de los estudios multitemporales se encuentran los siguientes:

- Definición de las campañas necesarias y temporalidad de las mismas que dependerá de la propia dinámica del fenómeno a estudiar.
- Elección del sistema de referencia (global o local) y de la referencia altimétrica.
- Selección de la escala de trabajo, acorde a la magnitud del fenómeno.
- Determinación de la técnica y del instrumental requerido.
- Configuración de la captura (número de estacionamientos/tomas, distribución de puntos de control, fechas y horarios idóneos, material auxiliar, etc).

#### **2.3.2. Estudio comparativo**

Una vez se han generado los productos correspondientes y necesarios para cada campaña se está en disposición de realizar el análisis multitemporal entre las mismas. Existen múltiples variantes de estudio, entre las que destacan:

- **Diferencia entre superficies.** Cálculo de distancias normales entre el MDS de referencia y el MDS a comparar. Las distancias obtenidas pueden ser positivas o negativas, según si el modelo comparado se encuentra por encima o por debajo del modelo de referencia.
- **Comparación de ortoimágenes.** Las diferencias presentes entre las distintas épocas comparadas representan la evolución planimétrica del objeto de estudio.

## Capítulo 3

---



### 3. Aplicación práctica

La Figura 3.1 muestra los distintos apartados que conforman el presente capítulo:

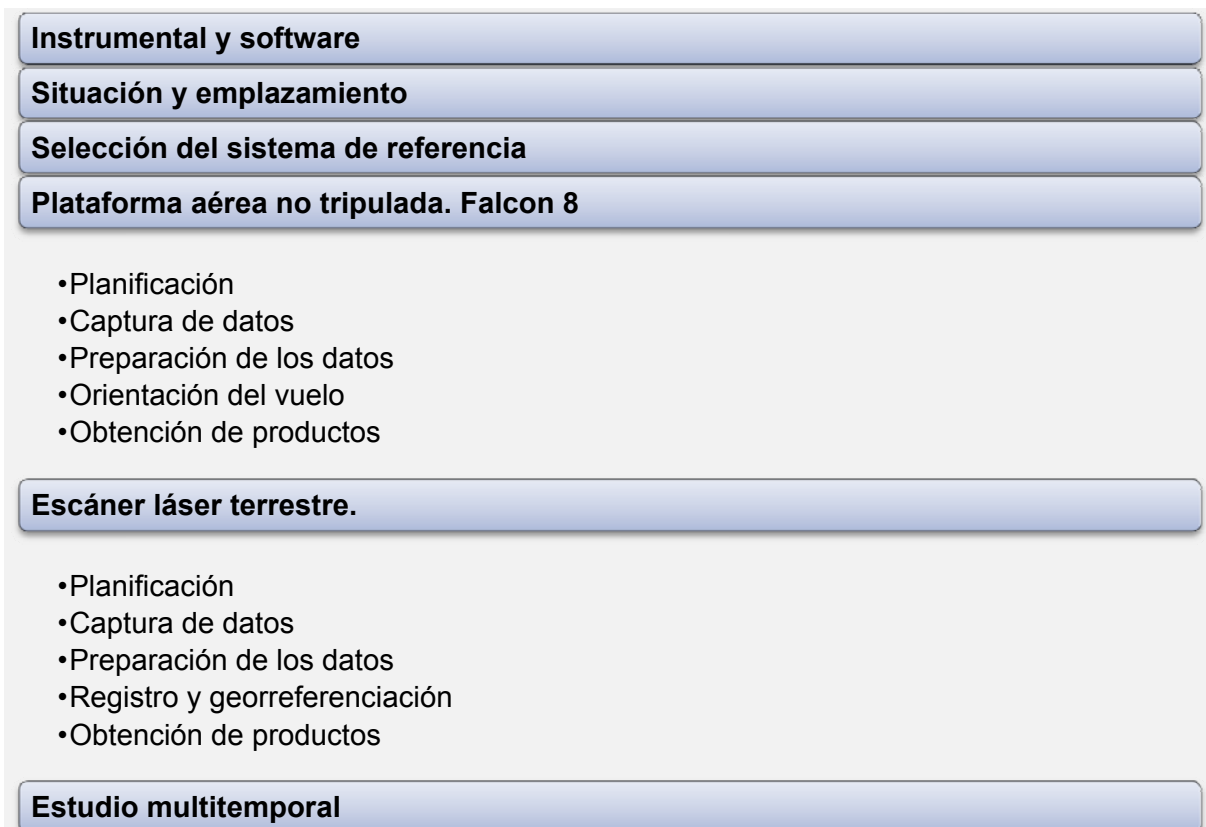


Figura 3.1. Aplicación práctica

#### 3.1. Instrumental y Software

##### 3.1.1. Instrumental

Para el desarrollo del proyecto se ha contado con los siguientes medios:

- **Sistemas GPS**

- ✓ LeicaSystem 1200. El sistema GPS LeicaSystem 1200 ha sido empleado en la densificación de la red geodésica así como en el apoyo topográfico. Está compuesto por el receptor GX1230+

y antena SmartTrack AX1202. Las características técnicas del receptor GX1230+ se recogen en la Tabla 3.1.



Sensor	Fase en Post-Proceso		Fase en Tiempo Real	
	Estático (H/V)	Cinemático (H/V)	Estático (H/V)	Cinemático (H/V)
<b>GX1230+</b>	5 mm+0.5ppm 10mm+0.5ppm	10mm+1ppm 20mm+1ppm	5mm+0.5ppm 10mm+0.5ppm	10mm+1ppm 20mm+1ppm



Tabla 3.1. Características técnicas Leica GX1230

- ✓ Leica Viva. Este equipo ha sido empleado en la observación de los puntos de control. El sistema está compuesto por el receptor GS15 y la controladora CS10. Las características técnicas del equipo se muestran en la Tabla 3.2.

Peso y Dimensiones	
<b>peso (GS15)</b>	1.34kg
<b>Dimensiones</b>	196 mm x 198 mm
<b>Memoria media</b>	1GB
Precisión (emc) con Tiempo Real(RTK)	
<b>Estándares seguidos</b>	Cumple con el ISO17123-8
<b>Estático Rápido (fase) Modo Estático tras Inicialización</b>	horizontal: 5mm +0.5ppm(emc)
	vertical:10mm+0.5ppm(emc)
<b>Cinemático (fase) En movimiento tras Inicialización</b>	horizontal: 10mm +1ppm(rms)
	horizontal:20mm+1ppm(emc)
Precisión (emc) con Postproceso	
<b>Estático (fase) con observaciones largas</b>	horizontal: 3mm +0.1ppm(emc)
	vertical:3.5mm+0.4ppm(emc)
<b>Estático y estático rápido (fase)</b>	horizontal: 5mm +0.5ppm(emc)
	vertical:10mm+0.5ppm(emc)

<b>Cinemático (fase)</b>	horizontal: 10mm +1ppm(rms)	
	horizontal:20mm+1ppm(ecm)	

Tabla 3.2. Características Técnicas receptor GS15

### ▪ Sistema UAV

El sistema UAV empleado en la ejecución de los vuelos fotogramétricos es el modelo Falcon 8 de ASCTEC, Ascending Technologies (Figura 3.2).



Figura 3.2. Sistema UAV Falcon 8 AscTec.

El dispositivo está provisto de antena GPS, sistema inercial (IMU) y 8 motores, que permiten una óptima estabilización en vuelo. El UAV se controla remotamente con una estación móvil, aunque puede ser programado con un sistema de navegación automático.

Las principales características del sistema se recogen en la Tabla 3.3:

<b>INFORMACION TÉCNICA</b>	
<b>Tipo</b>	Octocopter con forma característica en V (patentada)
<b>Tamaño (A x L x Alt)</b>	770x820x125 cm
<b>Propulsión</b>	100 w potencia max
<b>Tamaño de las hélices</b>	8" (aprox. 20cm)
<b>Baterías</b>	
<b>Tipo 1</b>	baterías LiPo con 8300 mAh
<b>Tipo 2</b>	baterías LiPo con 6200 mAh
<b>Peso sin carga</b>	940 gr
<b>Peso total en vuelo</b>	2000 gr
<b>Velocidad máxima de ascenso</b>	3 m/s en vuelo semi-automático (GPS o control de altura)
<b>Velocidad máx de descenso</b>	2m/s

<b>Velocidad de vuelo</b>	GPS con Video 6 m/s --- Manual >16m/s
<b>Tiempo de vuelo</b>	12 a 21 Min (depende de la carga y batería utilizada)

Tabla 3.3. Características Técnicas sistema UAV, modelo Falcon 8 de ASCTEC.

La cámara fotográfica incorporada al sistema UAV es una Sony NEX-5N, cuyas características principales se muestran en la Tabla 3.4:

Cámara digital Sony Nex 5	
<b>Píxeles totales del sensor (Mpx)</b>	Aprox. 16.7
<b>Tipo de sensor de imagen</b>	Sensor CMOS
<b>Filtro de color de sensor de imagen</b>	Color primario RGB
<b>Focal (mm):</b>	16
<b>Resolución (mm):</b>	4912 x 3264
<b>Tamaño del sensor (mm):</b>	24 x 16




Tabla 3.4. Características de la cámara Sony NEX-5N.

#### ▪ UAV ATyges Topodron

El sistema UAV empleado para la instalación de la cámara térmica oprtris PI 400 es el modelo FV8 de ATyges.

INFORMACION TÉCNICA	
<b>Dimensiones</b>	1050 mm diámetro
<b>Carga útil max</b>	2000 gr
<b>Alcance</b>	3000 m
<b>Velocidad</b>	35 km/h
<b>Viento</b>	15 km/h
<b>Autonomía</b>	4 km - 50 Ha
<b>Telemetría disponible</b>	Datos GPS Nivel Batería Altura Velocidad Temperatura Consumos Distancia Nivel de señal Aviso de alarmas




Tabla 3.5. Características Técnicas sistema UAV, modelo FV8 de ATyges.

Las principales características técnicas de la cámara oprtris PI 400 se muestran en la Tabla 3.6.

Características técnicas	
Focal	15 mm
Resolución	382 x 288 pixel
Rango espectral	7.5 – 13 $\mu$ m
Angulo horizontal /vertical/diagonal	38 ° /29 ° /49 °
Precisión	$\pm 2$ ° C o $\pm 2\%$
Rango de temperatura	-20°C to 900°C




Tabla 3.6. Características técnicas Cámara optris PI 400

- Estación fotogramétrica digital equipada con sistema de visión 3D

La estación fotogramétrica es un sistema modular de hardware y software empleado para la generación de los productos fotogramétricos.

- TLS Leica ScanStation C10

Características técnicas	
Tipo de Láser	Tiempo de Vuelo (TOF)
Alcance Max. /Min.	300m /0.1 m
Precisión en distancia	4 mm/ 50 m a un sigma
Precisión posicional	6 mm/50 m a una sigma
Velocidad de barrido	50000 puntos/s
Velocidad de Escaneo Vertical	50kHz
Ángulo de Escaneo Horizontal/Vertical	370° /270°
Cámara digital integrada	1920x1920 px (4 mega píxeles)
Almacenamiento	SSD 80GB




Tabla 3.7. Características técnicas TLS LeicaStation C10

- Como **material auxiliar**, se ha requerido:
  - ✓ Cámara réflex digital de gama alta (Canon D5)
  - ✓ Trípode
  - ✓ Bastones de sensibilidad 8'
  - ✓ Dianas

### 3.1.2. Software

El software empleado en la realización de proyecto ha sido:

- **Leica Geo Office**



Leica Geo Office es un software de oficina que ofrece las herramientas para la gestión, visualización, edición, procesado, importación y exportación de datos GPS, TPS y nivel.

Dichas funcionalidades estándar pueden ser ampliadas con opciones adicionales para transformaciones de coordenadas, post proceso GPS, procesado de datos de niveles, ajuste de la red, exportación GIS/CAD y superficies y volúmenes.

- **AscTecNavigator**



AscTecNavigator es el software de planificación de vuelo específico para los sistemas UAV de AscTec. AscTecNavigator permite trazar matrices, definir rutas y configurar los principales parámetros del sistema y del propio proyecto de vuelo, así como su ejecución. Las misiones pueden ser editadas en todo momento y pueden reproducirse exactamente tantas veces como se desee.

- **AgisoftPhotoScan**



Las principales capacidades que ofrece son la generación de modelos digitales de elevaciones, generación de ortofotografías verdaderas, georreferenciación directa/indirecta/mixta, procesamiento de imágenes multiespectrales así como reconstrucción 4D para escenas dinámicas. Las fotografías pueden ser tomadas desde casi cualquier posición, siempre que el objeto a ser reconstruido sea visible en al menos dos fotografías y la geometría de la imagen sea la adecuada (evitando en todo momento tomas divergentes, variaciones del zoom, etc.).

- **Maptak I-Site Studio**



MaptekI-Site Studio es un software específico para el tratamiento de nube de puntos. Presenta numerosas funciones y herramientas para el procesado de datos procedentes de TLS. Las capacidades que ofrece este software son la generación de modelos precisos 3D, análisis multitemporales y análisis geológicos.

- **LeicaCyclone** 

LeicaCyclone es un programa para procesar nube de puntos procedentes de escáneres láser terrestres Leica. En este TFG se ha empleado este software para la exportación de los escaneos a formato ptx para su posterior utilización en.....

- **Socet Set** 

Socet Set es una aplicación software para su integración en una estación fotogramétrica digital (Digital Photogrammetric Workstation o DPW). Ofrece potentes capacidades para la triangulación, extracción de modelos digitales del terreno, herramientas de edición asistidas con visión estereoscópica, ortorrectificación así como la realización, gestión y edición de mosaicos.

- **QGIS** 

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) libre y de código abierto para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Permite manejar formatos raster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así como bases de datos. Algunas de sus características son:

- Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
- Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, etc.
- Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.)

### 3.2. Situación y emplazamiento

La zona se localiza próxima al núcleo urbano de La Guardia de Jaén, en el entorno de la carretera A-3200 (Figura 3.3), que presenta un gran número de evidencias de deformación del firme. Se encuentra en la salida 46, hacia La Guardia de Jaén, de la Autovía Sierra Nevada-Costa Tropical.

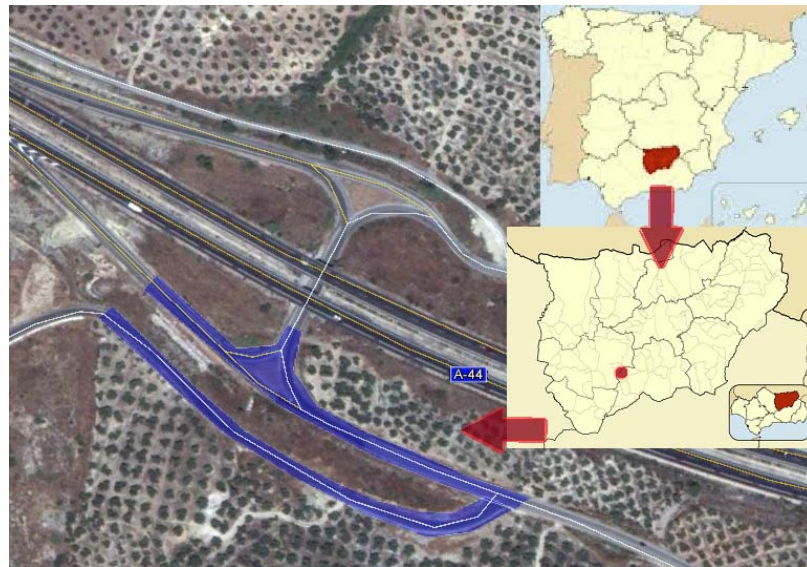


Figura 3.3. Zona de estudio



Figura 3.4. Fotografía aérea de la zona de estudio completa.

Cartográficamente la zona se encuentra localizada en la hoja 947 del Mapa Topográfico Nacional a escala 1/50.000 (Figura 3.5) y a su vez en la hoja 947-1 a escala 1/25000 (Figura 3.6).

0	861	862	863	864	865	86
2	883	884	885	886	887	88
3	904	905	906	907	908	90
4	925	926	927	928	929	
5	946	947	948	949	950	
7	968	969	970	971		
	990	991				

Figura 3.5. Distribución de las hojas del mapa topográfico nacional a escala 1/50000 en la provincia de Jaén

Las coordenadas geodésicas aproximadas del tramo de carretera objeto de estudio en el sistema de referencia ETRS89, adoptado como oficial para España son:

$$\text{Latitud } (\varphi) = -3^{\circ} 42' 2.62'' \text{ N}$$

$$\text{Longitud } (\lambda) = 37^{\circ} 45' 15.46'' \text{ W}$$



Figura 3.6. Mapa Topográfico Nacional 1:25000, EPSG: 2583, Hoja 947- 1 (Jaén)

Desde el punto de vista geológico, la zona se encuentran situada sobre las denominadas Unidades del Guadalquivir en los que predominan según los sectores: evaporitas y arcillas del Triásico, margas y arcillas del Cretácico-Paleógeno de afinidad subbética, o sedimentos margosos-arcillosos del Mioceno Inferior de la Cuenca del Guadalquivir.

En esta zona, las Unidades del Guadalquivir se encuentran cabalgadas por las Unidades Intermedias Béticas, representadas por potentes series de calizas tableadas del Jurásico Medio, que forman un relieve prominente. Dicho cabalgamiento está cortado por fallas normales y está jalonado por abanicos aluviales, pies de ladera y travertinos, asociados a surgencias al pie de las calizas jurásicas. En el caso estudiado, sobre las arcillas y margas deslizadas, se observan costras travertínicas de varios decímetros evidenciando una surgencia de agua de forma más o menos continua [13].

### **3.3. Selección del sistema de referencia a emplear para controlar la deformación**

Los estudios multitemporales consisten en el análisis de un fenómeno en diferentes campañas temporales. Es necesario, por tanto, establecer un marco de referencia al que referir toda la información correspondiente a las distintas campañas de observación. Esto permitirá garantizar la coherencia espacial de los datos permitiendo la integración correcta de datos procedentes de distintas fuentes y épocas. De esta manera las variaciones encontradas entre las diferentes campañas temporales se podrán atribuir a alteración del objeto y no a una falta de coincidencia entre los sistemas de referencia de ambos conjuntos de datos. [2]

El Real Decreto 1071/2007 establece el sistema ETRS89 como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. El elipsoide asociado a este Sistema de Referencia es el GRS80 y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, y sus densificaciones (Artículo 3 del BOE nº.207,29 de agosto de 2007).

Como sistema de referencia de altitudes oficial se tomarán los registros del nivel medio del mar en Alicante para la Península y las referencias mareográficas locales para cada una de las islas (Artículo 4 del BOE nº.207, 29 de agosto de 2007), es decir altitudes ortométricas. Sin embargo, las altitudes obtenidas, de manera directa, con posicionamiento GNSS son altitudes elipsoidales, referidas al elipsoide WGS84. Las transformaciones de altitudes elipsoidales a ortométricas se realizan utilizando el modelo de geoide EGM2008-REDNAP (adaptación del geoide mundial EGM08 a España).

A pesar de que el sistema de altitudes oficial es el ortométrico, en este TFG se ha adoptado como sistema de altitudes el elipsoidal con el propósito de disminuir los errores que se introducen por la interpolación del modelo de geoide EGM2008-REDNAP y que afectan a la componente Z.

Por tanto, para el presente trabajo se ha adoptado como sistema de referencia geodésico el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), trabajando con alturas elipsoidales y empleando el sistema de coordenadas tangencia o UTM en el huso 30.

La materialización del sistema de referencia se ha realizado mediante la densificación de la red geodésica oficial. Para ello se ha implantado en una zona externa una base de referencia (Figura 3.7), consiguiéndose de este modo mayor control de la zona.



Figura 3.7. Implantación de una base de referencia en una zona estable y externa a la carretera.

La base ha sido observada mediante el método de observación estático rápido, técnica que ofrece precisiones de 5mm + 0.5 ppm (componente horizontal) y 10mm + 0.5 ppm (componente vertical) según el instrumental empleado en este trabajo.

Este método trabaja con dos receptores bifrecuencia, considerado uno fijo y otro móvil. Se considera como receptor fijo de coordenadas conocidas la Estación de Referencia Permanente de la Universidad de Jaén (UJAE) perteneciente a la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP). El receptor móvil es estacionado sobre trípode en la base, esto es, la densificación de la red geodésica (Tabla 3.8).

Los datos correspondientes a la observación son registrados simultáneamente en ambos receptores y con la misma frecuencia de grabación (1s), donde el tiempo de observación se establece en torno a dos horas. Dada la longitud de la línea base y número de satélites presentes durante la observación, siempre superior a siete, los tiempos de observación deben ser al menos de 30 minutos. Si bien, se han observado más épocas aprovechando que, simultáneamente, se realizaron tareas de apoyo y medición. De esta manera, la calidad de las observaciones y, por tanto, de las coordenadas de la base se han garantizado.

Una vez registrada la información, se calcula en post-proceso las coordenadas ajustadas de la base implantada en la zona de trabajo.

<b>Coordenadas UTM (ETRS89)- Huso 30</b>	
<b>Estación Permanente UJAE</b>	<b>Base (densificación)</b>
<b>X<sub>UTM</sub></b> : 431168.550 m	<b>X<sub>UTM</sub></b> : 438182.231 m
<b>Y<sub>UTM</sub></b> : 4182554.780 m	<b>Y<sub>UTM</sub></b> : 4178723.740 m
<b>Altura elipsoidal (h)</b> : 527.770 m	<b>Altura elipsoidal (h)</b> : 615.556

**Tabla 3.8. Coordenadas UTM del receptor fijo (Estación de Referencia Permanente de la Universidad de Jaén) y del receptor móvil estacionado sobre trípode (base).**

Por otro lado, y dado que en el presente trabajo se van a fusionar de alguna manera datos provenientes de vuelos UAV y de escáner láser terrestre, el sistema de proyección cartográfica a emplear será el sistema UTM.

La proyección UTM utiliza un factor de escala  $K_0$  con el objetivo de reducir a la mitad las deformaciones lineales en las zonas más extremas del huso, por tanto, las magnitudes lineales están afectadas de dicho factor de escala. Este hecho provoca incoherencias en el tratamiento y procesamiento de datos, ya que el escáner láser terrestre permite medir coordenadas tridimensionales de forma directa. Por ello, para poder fusionar de manera correcta los datos fotogramétricos y de escáner láser es necesario llevar a cabo una transformación de coordenadas. De esta forma, se modifican las coordenadas de los puntos aplicando ese mismo factor de escala solo a las coordenadas X e Y una vez que los datos del escáner estén correctamente nivelados. La transformación se ha realizado empleando un programa desarrollado por el grupo de investigación Sistemas Fotogramétricos y Topométricos (TEP-213) de esta Universidad. Este programa aplica de forma automática el factor de escala al modelo ya alineado y georreferenciado, introduciendo la nube de puntos correspondiente al modelo alineado y georreferenciado, el factor de escala ( $k= 0,99965$ ) y las coordenadas de la base de referencia ( $X_B = 438182.2308$ ;  $Y_B = 4178723.7402$ ;  $Z_B = 615.5563$ ).

### **3.4. Plataforma aérea no tripulada Falcon 8**

#### **3.4.1. Planificación del trabajo**

Dentro de este apartado se incluye el diseño del vuelo fotogramétrico (planteado a partir de resultados preliminares de campañas anteriores proporcionadas por el grupo TEP-213) y de la red de apoyo mediante técnicas GNSS.

##### *3.4.1.1. Diseño del vuelo fotogramétrico*

La planificación del vuelo se ha realizado mediante el software AscTec Navigator. A partir de los parámetros suministrados (altura y ángulo de observación, número de pasadas, disparos por pasada, solapamientos longitudinal y transversal, datos de la cámara y punto de inicio) se obtendrán las posiciones que la cámara (waypoints) ha de tener en cada toma y las huellas de

cada fotograma en el terreno. La planificación del vuelo se almacena en diversos archivos en diferentes formatos, KML entre ellos.

En primer lugar es necesario disponer de una cartografía base (o bien una ortoimagen) que deberá estar georreferenciada y que se utilizará como referencia espacial del proyecto, permitiendo utilizar un elevado número de formatos tanto raster (por ejemplo, MrSID, JPEG2000, ECW, GeoTIFF, TIFF georreferenciado con TFW, PNG, entre otros), como vectoriales (por ejemplo, SHP, DXF, DGN, Mapinfo, entre otros). Por lo tanto la planificación comienza con la selección del sensor o cámara a emplear a partir de una base de datos editable y con carga de una imagen georreferenciada de la zona de estudio. Una vez visualizada la imagen, se selecciona el área de vuelo. [14]

Una vez que el proyecto ya ha sido definido, es posible el comenzar con las tareas de planificación del vuelo propiamente dichas, para lo cual será necesario la definición de una serie de parámetros básicos como, por ejemplo, la altura de disparo sobre el terreno, los solapes longitudinales y transversales a aplicar, la orientación de la línea de vuelo, etc. A continuación, en la Tabla 3.9 se detallan las características básicas de la planificación realizada para las campañas 20141223 y 20150327:

Parámetros de Vuelo	
Recubrimiento longitudinal [%]	60
Recubrimiento transversal [%]	30
GSD [mm]	14
Focal [mm]	16
Número de pasadas	2
Número de disparos/pasada	22
Angulo de inclinación de la cámara	90º
Distancia de disparo (D) [m]	45

Tabla 3.9. Parámetros de Vuelo introducidos en AscTEc Navigator

Una vez que los diversos parámetros de vuelo son introducidos, el programa calcula los centros de proyección de las fotografías automáticamente. Para finalizar, se indica la trayectoria de la línea de vuelo.

A modo ilustrativo, se muestra la planificación de vuelo correspondiente a la campaña 201401223 (Figura 3.8).

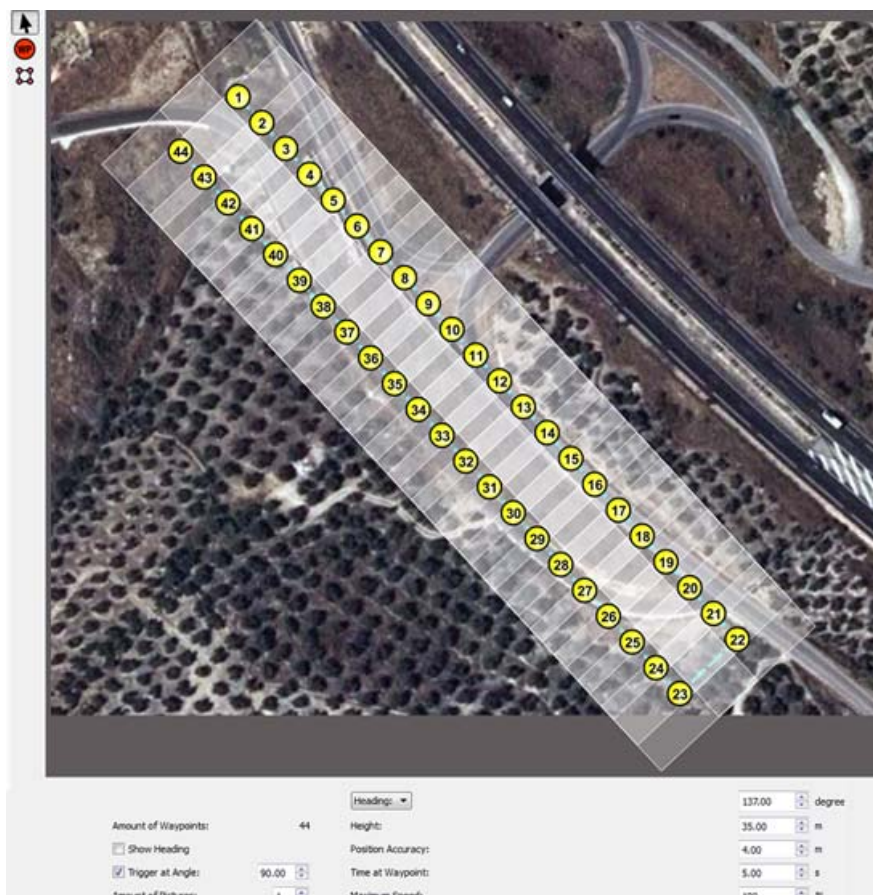


Figura 3.8. Huella de la fotografías en el terreno obtenidas con AscTec Navigator.

Antes de las salida a campo es necesario consultar servicios de información meteorológica para asegurarnos de que las condiciones ambientales son las adecuadas. En caso de no existir condiciones favorables, esto es, probabilidad de lluvias, velocidad del viento superior a 36km/h o bien presencia de rachas fuertes y/o temperaturas fuera del rango comprendido entre 0°C y 35°C, no se debe realizar el vuelo. Otros factores a tener en cuenta se refieren a la altura solar, sombras provocadas por objetos o nubes, las condiciones de iluminación, etc., que, en definitiva, puedan resultar en imágenes con contraste o radiometría inadecuada.

### 3.4.1.2. Diseño de la red de apoyo

En primer lugar hay que determinar el tamaño de los puntos de control para garantizar que estos sean perfectamente visibles e identificables en todas las fotografías.

Para la obtención del tamaño de las marcas o targets se han empleado las fórmulas expuestas en la Figura 2.2, mostrándose los resultados en la Tabla 3.10.

tamaño imagen [nº pix]		tamaño sensor [mm][*]		A [m]
U	V	X	Y	
4912	3264	24.0240	15.9638	0.069
$p_s$ [mm]	$p_N$ px]	D [m]	f [mm]	L [m]
0.00489	5	45	16	<b>0.06</b>

Tabla 3.10. Cálculos para determinar el tamaño de las marcas. (\*); a partir de los datos del archivo EXIF).

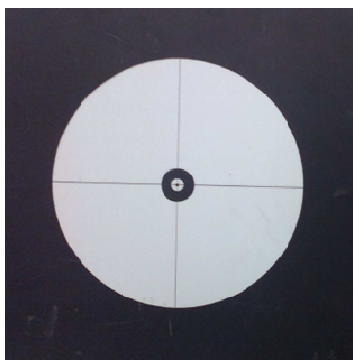


Figura 3.9. Diana empleada para el apoyo fotogramétrico

Tras examinar la zona de estudio y evaluar las posibles posiciones o distribución de los puntos de control, de manera que se cumpla con los requisitos establecidos en la página 29, se decide que estos pueden distribuirse como se muestra en el croquis de la de la Figura 3.10. De este modo, la zona de vuelo y especialmente la zona de interés queda completamente cubierta.

La planificación de la situación de los puntos de control se ha realizado sobre un gráfico de vuelo que incluye la traza de las pasadas y las huellas de los fotogramas. Esto permite planificar la situación de los puntos de control de manera que estos aparezcan en el mayor número de fotografías posible, incluyendo la zona de solape transversal entre ambas pasadas.

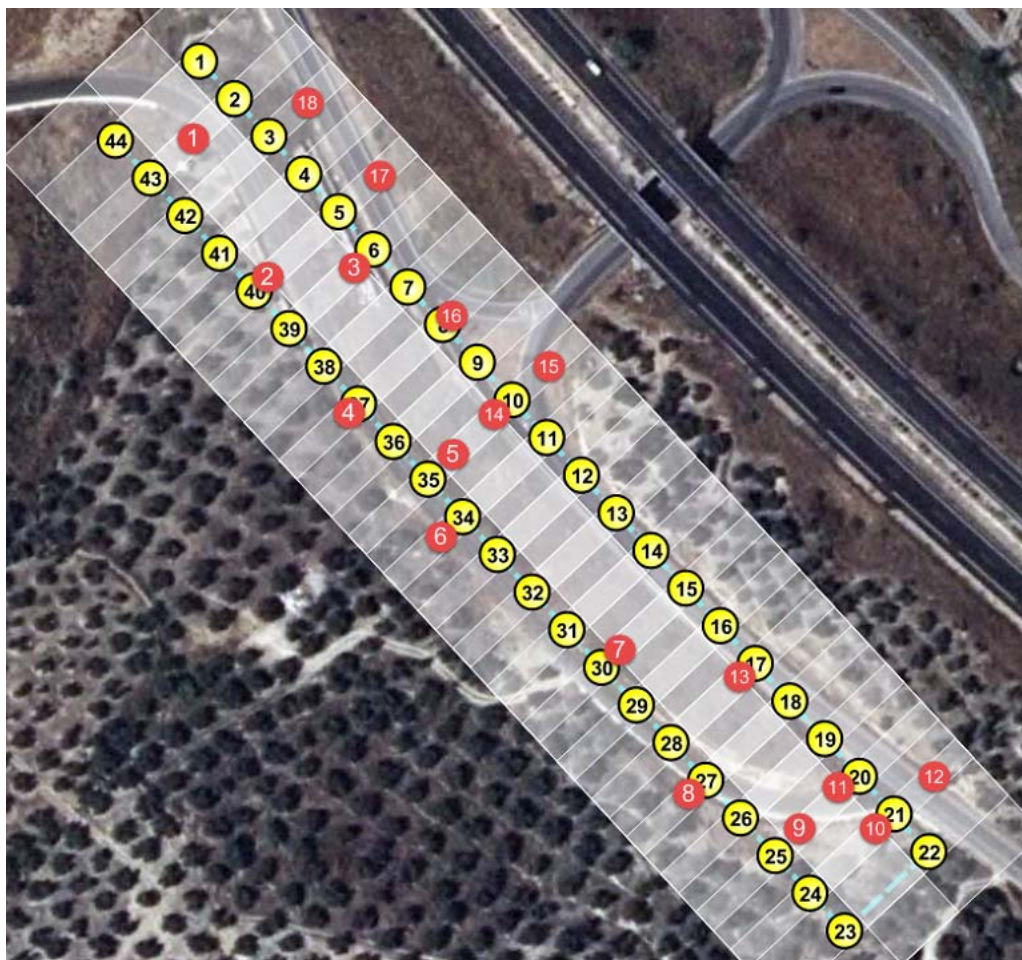


Figura 3.10. Planificación de la distribución de los puntos de control.  
(En rojo los puntos de control, en amarillo puntos de disparo).

### Estudio de incertidumbre a priori

Es necesario realizar un estudio previo de las incertidumbres para comprobar que tanto la metodología como la instrumentación empleada para medir los puntos de control, son las adecuadas para la realización de este trabajo.

El estudio de incertidumbres se divide en dos partes, un estudio para la incertidumbre planimétrica y un estudio para la incertidumbre altimétrica. Este estudio será realizado a partir de datos aproximados y de las características técnicas de la instrumentación empleada.

- Estudio de incertidumbre de la Base

Para calcular la incertidumbre de la base se considera una distancia aproximada entre esta y la estación de referencia permanente "UJAE"

perteneciente a la RAP (Red aAndaluza de Posicionamiento), tomando como precisiones del equipo las recogidas en la Tabla 3.1. La estación permanente de la Universidad de Jaén se considera libre de error.

### **a) Incertidumbre planimétrica de la base**

Teniendo en cuenta que la distancia aproximada desde la estación de referencia a la zona de trabajo es de 8 km, se obtiene:

- Incertidumbre de la línea base entre la estación de referencia y la base B1:

$$\sigma_{P_{LB}} = \sqrt{a^2(m) + \left[\frac{b(ppm) \cdot D(m)}{1000000}\right]^2} = \pm 0.0064m$$

donde  $a=0.005m$ ,  $b=0.5ppm$  y  $D= 8000m$ .

- La incertidumbre planimétrica en la base será igual a la componente cuadrática de las incertidumbres anteriores:

$$\sigma_{BP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{LB}^2} = \pm 0.0067m$$

Donde  $\sigma_e = 0.000m$  y  $\sigma_s = 0.002m$  siendo estos la incertidumbre del posicionamiento de la estación y de la señal, respectivamente.

### **b) Incertidumbre altimétrica de la base**

$$\sigma_{Z_{LB}} = \sqrt{a^2(m) + \left[\frac{b(ppm) \cdot D(m)}{1000000}\right]^2} = \pm 0.011m$$

Donde  $a=0.010m$ ;  $b=0.5ppm$ ;  $D_{\text{máx}}= 8000 m$ ;  $\sigma_j=0.000m$   $\sigma_i=0.002m$ , siendo  $\sigma_j$  la incertidumbre en la inclinación de la señal y  $\sigma_i$  la incertidumbre en la altura del aparato.

- La componente cuadrática de los errores calculados anteriormente nos proporciona la incertidumbre altimétrica de la base:

$$\sigma_{BP} = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_i^2 + \sigma Z_{LB}^2} = \pm 0.011m$$

- La combinación de las incertidumbres planimétrica y altimétrica permite obtener la precisión de la base en XYZ:

$$\sigma_{XYZ} = \sqrt{\sigma P_B^2 + \sigma Z_B^2} = \pm 0.013m$$

- Estudio de incertidumbres para los puntos de control

A continuación se calcula la incertidumbre de los puntos de control medidos en RTK. Se utilizan las precisiones para la metodología en RTK.

#### **a) Incertidumbre planimétrica**

Se considera una distancia máxima entre la base B1 y los puntos de control de 300m.

- Incertidumbre de la línea base entre la estación de referencia y la base B1:

$$\sigma_{P_{LB}} = \sqrt{a^2(m) + \left[ \frac{b(ppm) \cdot D(m)}{1000000} \right]^2} = \pm 0.005m$$

donde  $a=0.005m$ ,  $b=0.5ppm$  y  $D_{m\acute{a}x}= 300m$

- La incertidumbre planimétrica a priori de los puntos levantados será la componente cuadrática de las incertidumbres calculadas anteriormente.

$$\sigma_{BP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_s^2 + \sigma P_{LB}^2} = \pm 0.006m$$

Siendo:  $\sigma_e=0.002m$  y  $\sigma_s=0.002m$

**b) Incertidumbre altimétrica.**

- Incertidumbre en la línea base:

$$\sigma_{Z_{LB}} = \sqrt{a^2(m) + \left[\frac{b(ppm) \cdot D(m)}{1000000}\right]^2} = \pm 0.010m$$

donde  $a=0.010m$ ,  $b=0.5ppm$  y  $D_{máx}= 300m$

- La incertidumbre altimétrica de los puntos viene dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{Z_{LB}}^2} = \pm 0.011m$$

Donde  $\sigma_i=0.002 m$  y  $\sigma_j$  es la incertidumbre debida a la inclinación del jalón, quedando esta determinada a partir de la siguiente fórmula:

$$\sigma_j = m \cdot \beta(rad)$$

Siendo  $m$  la altura del jalón (2 m) y  $\beta$  el ángulo de inclinación del jalón (8')

$$\sigma_j = m \cdot \frac{\beta(')}{rad} = \pm 0.005m$$

- A partir componente cuadrática de las incertidumbres planimétrica y altimétrica se obtiene la precisión 3D de los puntos de control.

$$\sigma_{XYZ} = \sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_Z^2} = \pm 0.012m$$

- Concatenación final de incertidumbres

Hasta ahora se han calculado las incertidumbres que tienen por separado cada elemento, desde la base B hasta cualquier punto de apoyo levantado. Por tanto, solo queda estudiar la incertidumbre que tendrían los puntos de control, considerando la incertidumbre obtenida en la base B.

Se obtendrá la incertidumbre total expandida, teniendo en cuenta la incertidumbre de la base.

$$\sigma T_{XYZ} = \sqrt{0.013^2 + 0.012^2} = \pm 0.018m$$

La incertidumbre absoluta de los puntos de control será  $\pm 0.018m$ .

### 3.4.2. Captura de datos.

La captura de datos en campo se realiza atendiendo a lo establecido en la fase anterior de planificación.

#### 3.4.2.1. Apoyo topográfico mediante GNSS

Los puntos serán medidos mediante observación RTK y estático relativo desde la base de referencia materializada en la zona de estudio. De esta manera, se obtienen coordenadas directamente en campo y observaciones para hacer el post proceso con el fin de eliminar los errores propios del sistema, calculando los incrementos de coordenadas desde el equipo de referencia al móvil.

Esta operación se realiza antes del vuelo fotogramétrico (Figura 3.11) para asegurar que la posición de las dianas no es modificada ni alterada en el proceso de medición de las mismas, evitando así errores de posición transmitidos en la fase de orientación absoluta.



Figura 3.11. Observación de los puntos de control.

Los croquis de distribución de los puntos de control medidos correspondientes a las campañas 20141223 y 20150327 se muestran en la Figura 3.12 y Figura 3.13, respectivamente.

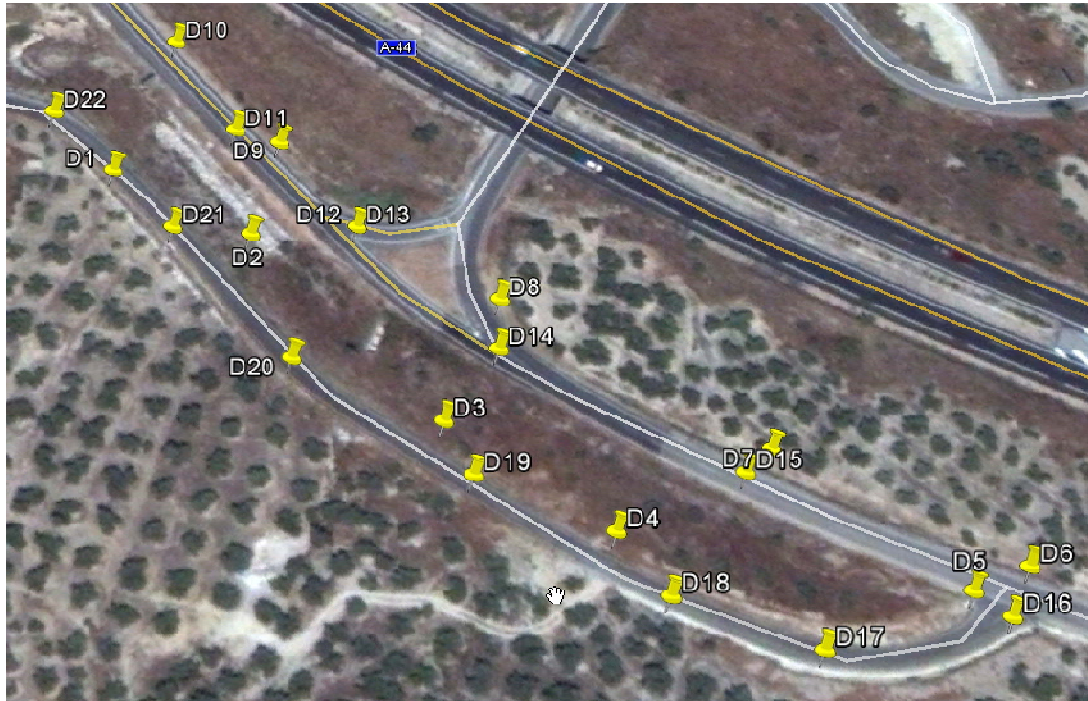


Figura 3.12. Distribución puntos de control. Campaña 20141223



Figura 3.13. Distribución puntos de control. Campaña 20150327

### 3.4.2.2. Ejecución del vuelo

Una vez observados todos los puntos de control, se procede a realizar el vuelo mediante el UAV Falcon 8 según el plan de vuelo programado mediante el software AscTec Navigator. Durante la realización del vuelo se constató que las condiciones meteorológicas y de visibilidad en la zona de trabajo fueran las idóneas para la realización de los trabajos fotogramétricos.

Las condiciones ambientales correspondientes a las campañas de vuelo realizadas para el presente TFG quedan recogidas en la Tabla 3.11.

Campaña	Temp. Media	Precipitación	Direc. Viento	Vel. Viento	Hora inicio
20141223	11.3º	0 mm/h	NE	1.8m/s	13:43
20150327	16.1º		WNW	2.9 m/s	11:41

Tabla 3.11. Condiciones meteorológicas correspondientes a las dos campañas realizadas (datos tomados de: <http://www.ujaen.es/dep/fisica/estacion/historico1.html>).

El dispositivo es inicializado en tierra y despega controlado manualmente por el piloto mediante la controladora (Figura 3.14).



Figura 3.14. Vuelo mediante UAV Falcon 8.

Una vez ha alcanzado una altura de seguridad suficiente, se activa la opción de realizar vuelo planificado y este se realiza automáticamente. Es decir, el vuelo se realiza en modo autónomo y la adquisición de imágenes en modo parada (stop), de manera que el UAV vuela hacia cada punto de disparo (o way point), previamente definido en el plan de vuelo, y planea sobre ese punto. Para la toma se estableció un intervalo de tolerancia de 4 m y 5 s como tiempo máximo para la captura de la imagen. Este modo de adquisición de imágenes permite, por tanto, tomar la imagen con precisión en el punto exacto. (Figura 3.15 y Figura 3.16).

Una vez finalizado el vuelo, el dispositivo puede regresar, manual o automáticamente, hasta la vertical de la posición de despegue (a una altura definida previamente) y el piloto realiza el aterrizaje manualmente.

Es importante que durante la ejecución del vuelo se mantenga la conexión entre la estación base (controladora y ordenador) y el UAV ya que las órdenes son enviadas desde tierra al UAV. Si no fuese el caso, habría que dar por finalizado el vuelo y comenzar de nuevo otro vuelo a partir del último punto de disparo realizado antes de la desconexión.

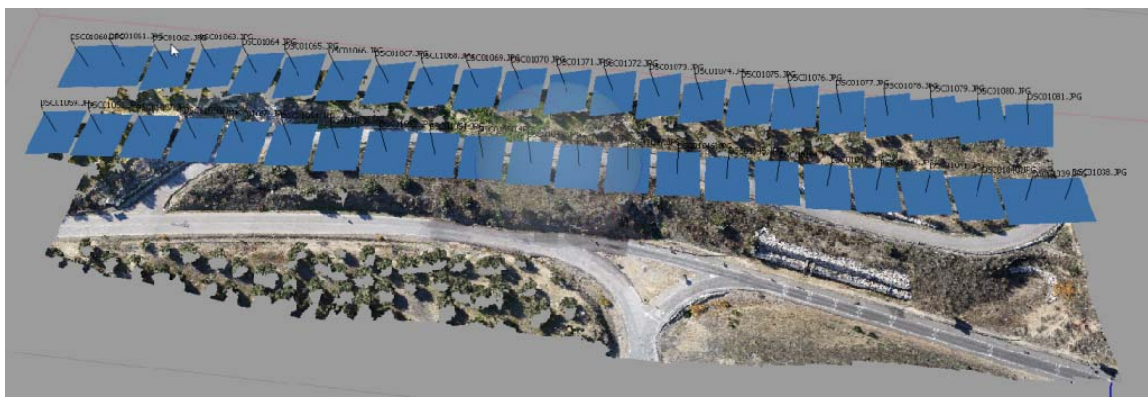


Figura 3.15. Modelo Agisoft Photoscan

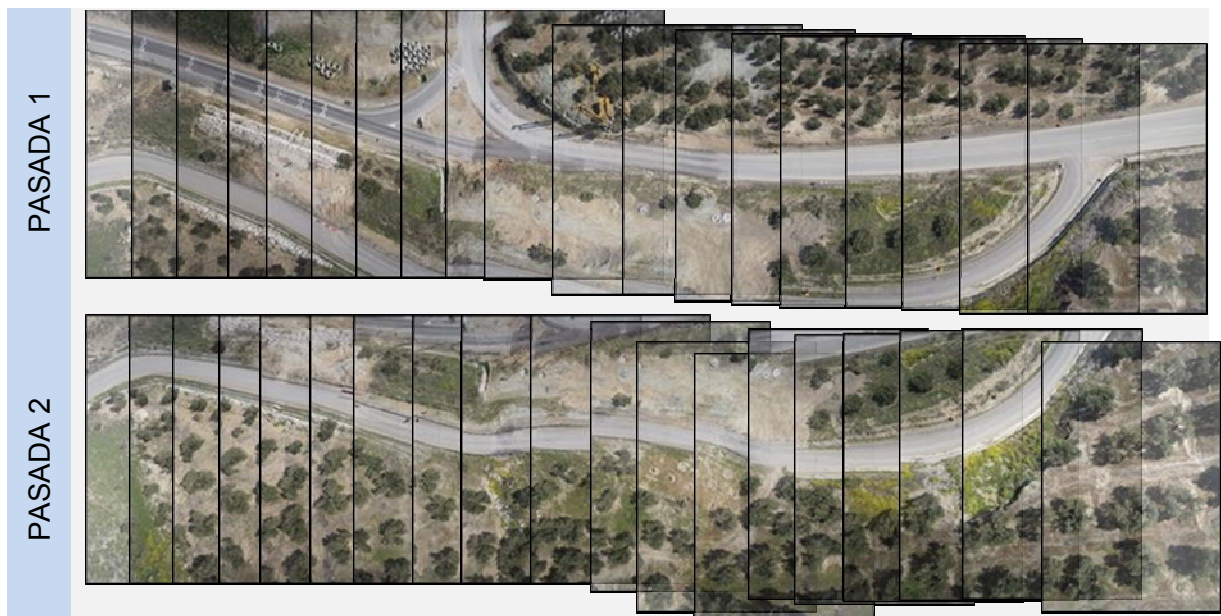


Figura 3.16. Fotografías tomadas durante el vuelo con UAV Falcon 8. Campaña 20150327

La Tabla 3.12 recoge las características más relevantes de las dos campañas realizadas para el desarrollo de este TFG.

Condiciones Técnicas						
Campaña	Instrumento	Nº Fotografías	Nº Pasadas	Tipo de pasada	D [m]	Nº Puntos Apoyo
20141223	UAV Falcon 8	44	2	Cenital	45	22
20150327						

Tabla 3.12. Campañas de observación realizadas con sistema UAV.

### 3.4.3. Preparación de los datos

El procesado de los datos se ha realizado mediante el software Leica Geo Office. Con el procesado se resuelven las ambigüedades y se compensan los errores existentes en las líneas base. Se compensa primero la línea base entre la base B1, implantada en la zona de estudio, y la estación de referencia UJAE. Posteriormente se compensan las líneas base entre los puntos de control y la base B1 ya ajustada (Figura 3.17).

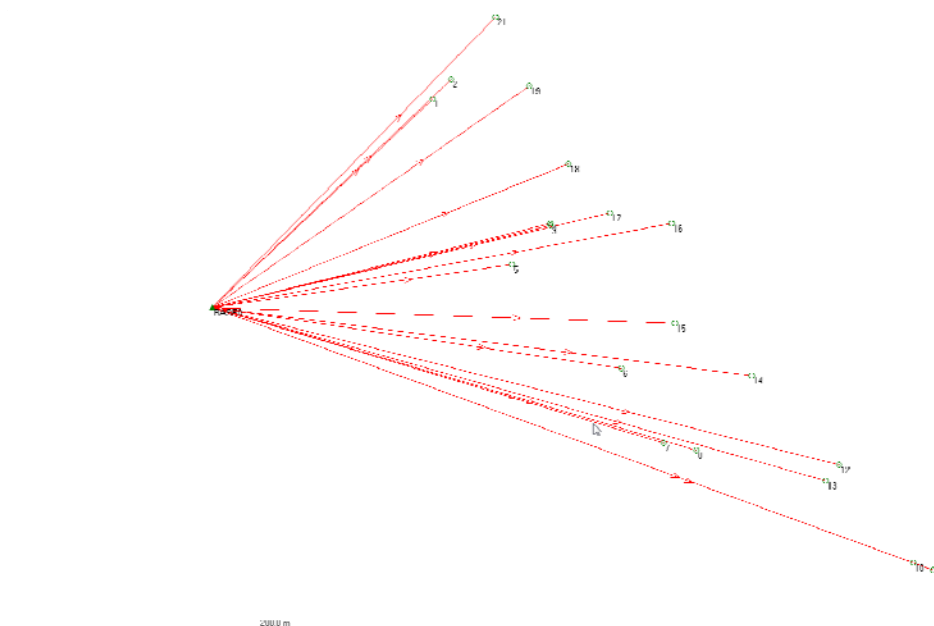


Figura 3.17. Líneas Base puntos de control (captura de pantalla de Leica GeoOffice)

Tras realizar el ajuste de las coordenadas de los puntos medidos con el software Leica Geo Office, se obtienen las desviaciones típicas de dichos puntos, que quedan reflejadas en la Tabla 3.13 .

ID	$\sigma_x$ [m]	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_z$ [m]	RMS [m]
D1	0.003	0.003	0.009	0.010
D2	0.003	0.003	0.009	0.010
D3	0.004	0.004	0.012	0.013
D4	0.003	0.003	0.010	0.011
D5	0.004	0.004	0.014	0.015
D6	0.003	0.003	0.011	0.012
D7	0.003	0.003	0.011	0.012
D8	0.003	0.003	0.011	0.012
D10	0.003	0.003	0.011	0.012
D11	0.003	0.003	0.010	0.011
D12	0.003	0.003	0.010	0.011
D13	0.003	0.003	0.010	0.011
D14	0.003	0.003	0.010	0.011
D15	0.003	0.003	0.010	0.011
D16	0.003	0.003	0.010	0.011
D17	0.003	0.004	0.010	0.011
D18	0.003	0.003	0.010	0.011
D19	0.003	0.003	0.009	0.010
D21	0.004	0.004	0.010	0.011
D22	0.006	0.007	0.017	0.019
B	0.002	0.003	0.006	0.007

Tabla 3.13. Desviaciones típicas de los puntos de control y la base (B). Campaña 20150327

La Tabla 3.14 y Tabla 3.15 recogen las coordenadas ajustadas correspondientes a los puntos de control medidos para las campañas 20141223 y 20150327 respectivamente.

ID	X <sub>UTM30</sub> [m]	Y <sub>UTM30</sub> [m]	h[m]
D1	438272.8418	4178785.3034	585.7029
D2	438301.8328	4178760.4014	583.2599
D3	438334.8098	4178700.7554	587.7199
D4	438365.8058	4178663.0884	588.4849
D5	438439.1048	4178628.9144	586.6379
D6	438454.9548	4178630.8444	587.3579
D7	438407.8448	4178673.8704	584.4379
D8	438356.6998	4178728.0464	579.4339
D9	438314.9898	4178784.9184	578.2219
D10	438295.3038	4178819.2594	579.8189
D11	438304.6308	4178790.1854	578.9179
D12	438327.1618	4178756.0534	578.2969
D13	438327.1918	4178756.0254	578.3009

<b>D14</b>	438352.6968	4178715.5684	580.9229
<b>D15</b>	438399.6238	4178669.7244	583.7459
<b>D16</b>	438445.3198	4178620.8754	587.3199
<b>D17</b>	438401.0878	4178624.0704	588.0099
<b>D18</b>	438372.8848	4178645.5744	588.6309
<b>D19</b>	438337.9698	4178685.7284	588.4019
<b>D20</b>	438303.0618	4178725.9614	587.5469
<b>D21</b>	438283.0248	4178766.5754	584.4559
<b>D22</b>	438261.1638	4178805.3594	587.4359

Tabla 3.14. Resultado puntos de control campaña 20141223

<b>ID</b>	<b>X<sub>UTM30</sub> [m]</b>	<b>Y<sub>UTM30</sub> [m]</b>	<b>h[m]</b>
<b>D1</b>	438262.3329	4178799.3423	587.0135
<b>D2</b>	438269.1760	4178806.5751	587.3576
<b>D3</b>	438305.7163	4178752.8599	584.8091
<b>D4</b>	438305.7562	4178753.4876	584.8076
<b>D5</b>	438291.6641	4178738.3835	586.4447
<b>D6</b>	438331.8865	4178700.2660	588.2557
<b>D7</b>	438347.2722	4178672.8612	588.3169
<b>D8</b>	438359.3520	4178670.1865	588.0940
<b>D10</b>	438439.0530	4178628.8326	586.6659
<b>D11</b>	438446.3497	4178626.1299	587.2423
<b>D12</b>	438411.8861	4178664.6726	584.3185
<b>D13</b>	438407.0693	4178658.8947	584.5620
<b>D14</b>	438379.7185	4178697.6760	581.9390
<b>D15</b>	438351.4293	4178716.9515	580.8961
<b>D16</b>	438350.2994	4178753.6453	577.8130
<b>D17</b>	438327.5282	4178757.5063	578.2425
<b>D18</b>	438312.2930	4178775.5490	578.6053
<b>D19</b>	438297.9709	4178804.3101	579.3182
<b>D21</b>	438285.5926	4178829.4571	580.1298
<b>D22</b>	438357.0520	4178727.7268	579.4720

Tabla 3.15. Resultado puntos de control campaña 20150327.

#### 3.4.4. Orientación del vuelo con Agisoft PhotoScan

Una vez cargadas las imágenes, en una primera fase PhotoScan realiza la alineación de pares de imágenes por medio de la detección de puntos homólogos. En concreto, la detección de puntos se basa en la búsqueda de puntos fáciles de detectar en múltiples imágenes.

Posteriormente, a través de un algoritmo propio basado en técnicas de Structure from Motion (SfM), encuentra las ubicaciones de las estaciones de disparo en una primera aproximación y las ajusta posteriormente utilizando otro algoritmo de ajuste de haces. Todo ello, se basa en el empleo de un par inicial de imágenes, a partir del cual se estiman el resto de posiciones de las cámaras y puntos homólogos entre diferentes imágenes en un sistema arbitrario, tomando una de estas cámaras como referencia. De esta manera el algoritmo posiciona cada uno de los puntos detectados en varias fotografías (un mínimo de tres) y genera una nube de puntos inicial poco densa. [15]

Los parámetros de orientación de las imágenes y los puntos calculados se pueden refinar mediante autocalibración para obtener unos valores más precisos. Ello, además, permite utilizar una cámara no métrica, ya que sus parámetros internos serán estimados durante el ajuste.

Un ejemplo del proceso de reconstrucción de estructura a grandes rasgos se muestra en la Figura 3.18.

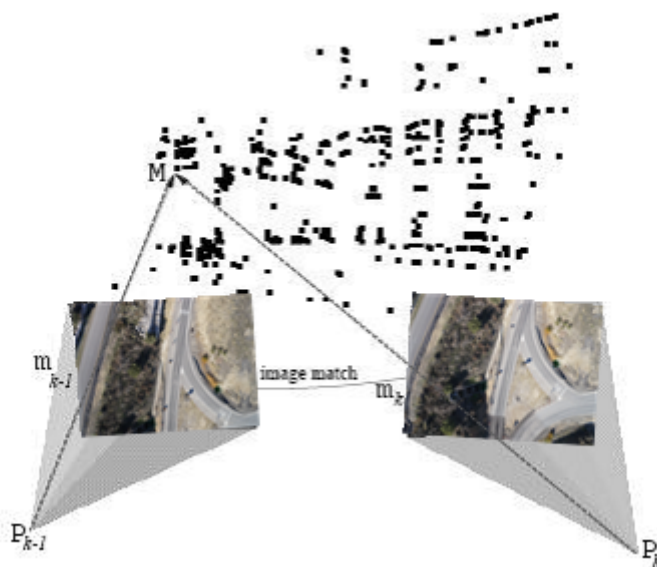


Figura 3.18. Detección y cálculo de puntos homólogos. La imagen muestra las correspondencias (puntos ajustados) entre dos cámaras para la reconstrucción de escenarios.

El sistema modelo en el cual se ajusta el bloque es arbitrario, pues no está nivelado ni orientado respecto al sistema de referencia definido para el presente trabajo. El proceso de orientación absoluta requiere pues de la medida de puntos de control (Figura 3.19). Una vez medido tres puntos de control, en más de dos

fotografías, PhotoScan es capaz de estimar automáticamente la posición aproximada del resto de puntos de control a través del conjunto de imágenes.

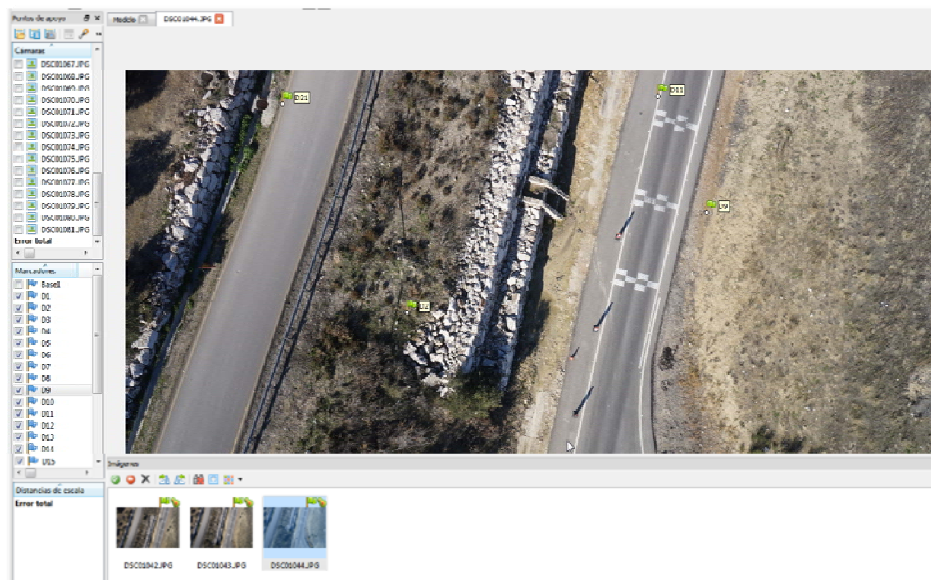


Figura 3.19. Medida de puntos de control en Agisoft PhotoScan.

El siguiente paso consiste en la creación de la geometría a partir de la nube de puntos poco densa, también denominada nube dispersa (*sparse cloud*), de las posiciones de la cámara y de las imágenes. Esta etapa del proceso es la más costosa en tiempo y en uso de recursos del ordenador. Durante ella PhotoScan reconstruye una nube de puntos más densa (Figura 3.20) , que puede tener millones de puntos (frente a, por ejemplo, miles de puntos de la nube dispersa), y a partir de ella realiza el modelado de la malla poligonal tridimensional, ajustándose más o menos al objeto o la escena real dependiendo de los parámetros establecidos.

Las mallas poligonales obtenidas se muestran en tres acabados distintos: con un sombreado monocromático, como una malla poligonal y con un sombreado en color, en el que el color se deduce de los valores RGB de los puntos de la nube de puntos densa (Figura 3.21). En este punto del proceso la malla puede ser mejorada por medio de algunas herramientas de edición que permiten la eliminación de elementos aislados o el relleno de huecos. También se puede reducir el número de polígonos de la malla.

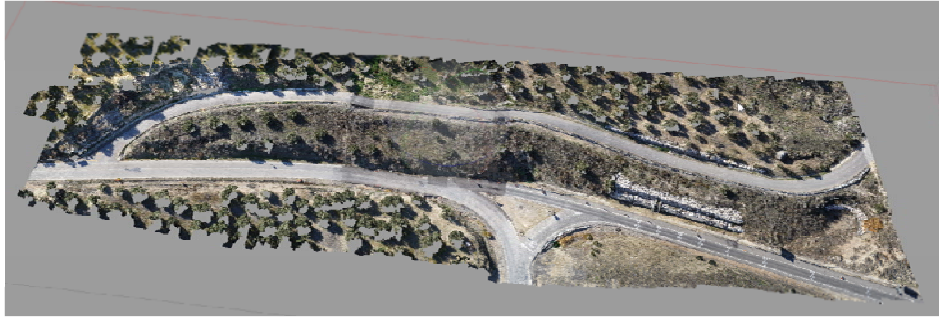


Figura 3.20. Reconstrucción de la nube de puntos densa en PhotoScan.

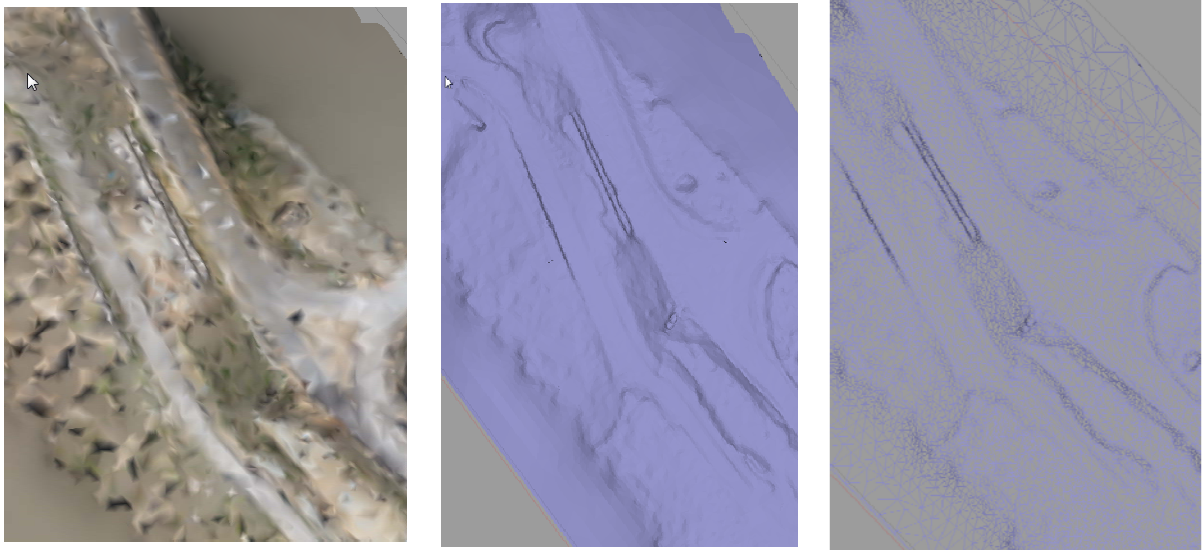


Figura 3.21. Mallas poligonales obtenidas mediante PhotoScan. De izquierda a derecha: sombreado en color, sombreado monocromático, malla poligonal.

El último paso consiste en la creación de la textura fotográfica. PhotoScan comienza parametrizando la superficie del modelo y asignándole a cada parte de la malla un trozo de la imagen, creando así un atlas de textura (Figura 3.22).

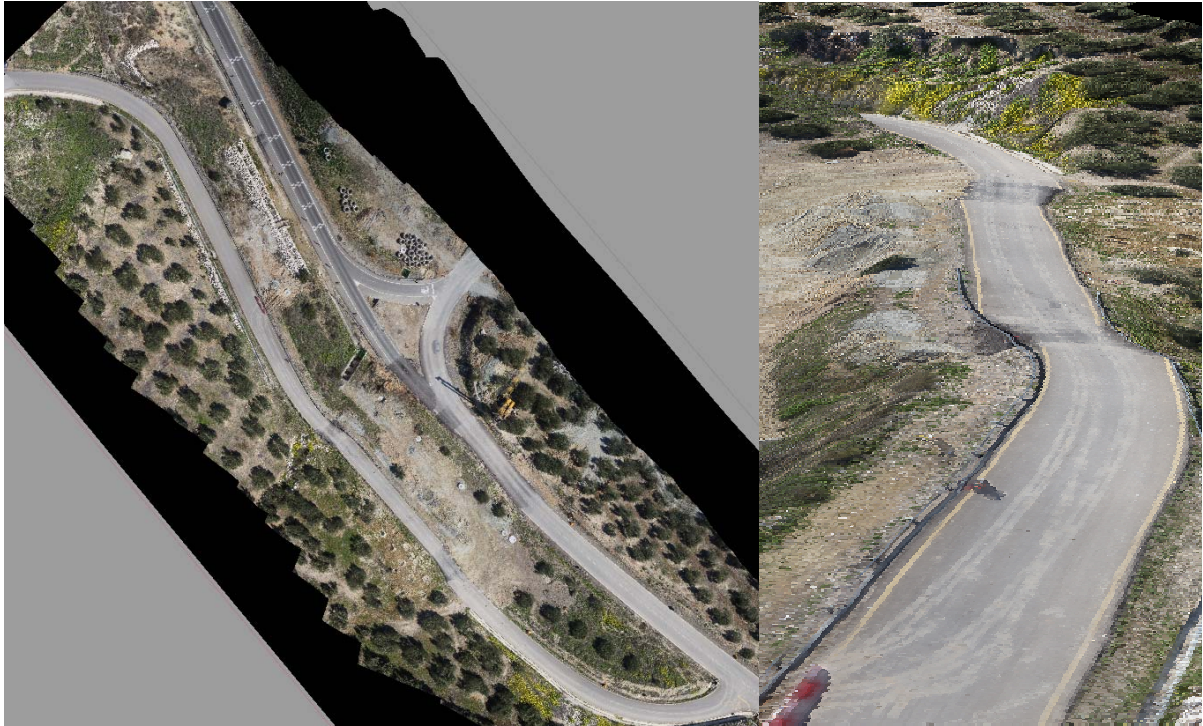


Figura 3.22. Resultado del texturizado con Agisoft PhotoScan.

#### 3.4.5. Obtención de productos (MDE y ortofotografía)

El modelo 3D referenciado, renderizado y texturizado se puede exportar a diversos formatos estándares o propietarios. También se puede exportar la nube de puntos densa, los modelos digitales de elevación deducidos de los mapas de profundidad, y la ortofoto. El archivo de los modelos 3D se realiza en el formato nativo .psz, y en formatos estándares como .ply (Polygon File Format o Stanford Triangle Format), .pdf 3D (Portable Document Format en 3D) y .dae (formato de intercambio 3D basado en XML).

### 3.5. Escáner láser terrestre.

#### 3.5.1. Planificación

La captura de datos se realizará con el TLS Leica ScanStation C10 que pertenece a los denominados escáneres panorámicos con capacidad para un barrido horizontal de 360° y vertical de 270°. Teniendo en cuenta los factores descritos en el apartado 2.2.1, se han determinado las posiciones del escáner

como se muestra en la Figura 3.23 y Figura 3.24, asegurando la completa cobertura del área de interés.



Figura 3.23. Planificación posiciones óptimas del escáner láser.

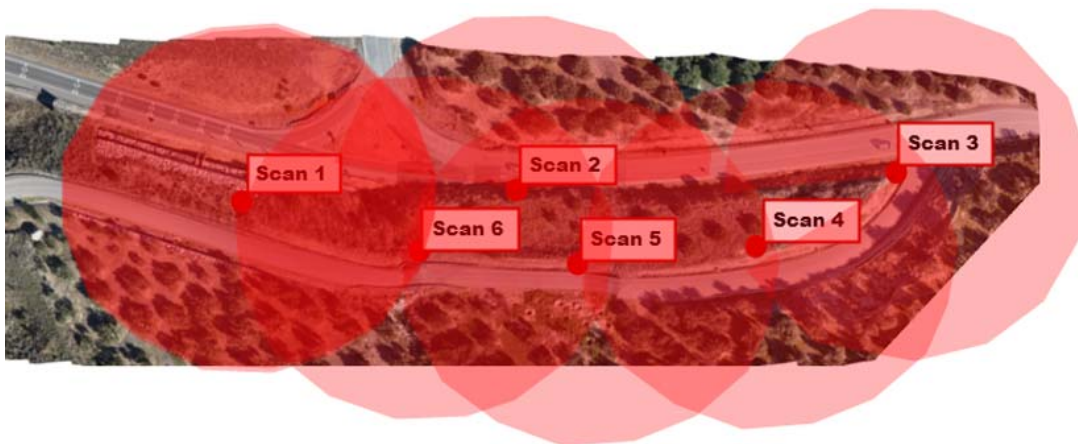


Figura 3.24. Croquis de las áreas cubiertas desde cada estación de escaneo.

#### 3.5.1.1. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia

Es necesario determinar las posiciones óptimas de los puntos de referencia para poder realizar la georreferenciación de las nubes de puntos obtenidas.

En esta ocasión, las posiciones de los centros de escaneo serán determinados de forma directa durante la captura de datos mediante observación RTK. Esto implica la reducción del número de dianas a emplear. Por tanto, para resolver la transformación correctamente es suficiente añadir un punto de control en cada escaneo. De este modo se resuelve la transformación evitando una configuración crítica de puntos alineados.

### 3.5.2. Captura de datos

#### 3.5.2.1. Resolución

En primer lugar se materializó en el área de estudio una base de referencia. Sobre el escáner láser terrestre se instala un receptor GPS durante la realización de cada escaneo (Figura 3.25). De esta manera obtendremos, en post-proceso, las coordenadas del origen de cada escaneo, ya que el soporte sobre el que se instala se encuentra calibrado y el “offset” es conocido. Así mismo, se midió una diana por cada escaneo mediante observación RTK. Las coordenadas de las dianas junto con las coordenadas del origen de cada escaneo y las áreas de solape entre estos permitirán el registro y georreferenciación de los datos adquiridos, siendo los tiempos de trabajo de campo reducidos.



Figura 3.25. Captura con TLS Leica ScanStation C10.

Para evitar la falta de cobertura o solape entre tomas se debe cargar la última imagen antes de mover el escáner y comprobar que aparece la mitad de la imagen para asegurar el solape.

La toma de los datos se realizó según las especificaciones establecidas en la fase anterior. Los dos primeros escaneos fueron realizados a una resolución de 5 cm a 100 m, de acuerdo con la planificación. Sin embargo la resolución fue reducida en los escaneos posteriores a 5 cm a 50 m ya que la densidad de puntos era excesiva así como los tiempos de captura. En cualquier caso, dado los

solapes desde diferentes estaciones, se garantizaba una resolución mayor de 5 cm a 50m.

### 3.5.2.2. Adquisición de escaneos y medida de puntos de control

La toma de datos mediante esta metodología se consiguió a partir de 7 escaneos (Tabla 3.16).

Campaña	Instrumento	Nº Estaciones	XYZ centro	Apoyo	Nºpuntos
20150327	Leica C10	7	Si	6	38769434

Tabla 3.16. Características correspondientes a la campaña TLS.

En la Tabla 3.17 se muestran las principales características de los escaneos realizados.

Scan	NºPuntos	Ángulos de barrido Hz (sexagesimales)
Scan1	2275226	35º
Scan2	8922348	170º
Scan3	5639734	340º
Scan4	6077855	360º
Scan5	5187867	360º
Scan6	5228127	360º
Scan7	5438266	360º

Tabla 3.17. Características de los escaneos realizados

Los puntos de control pertenecientes a la campaña realizada con TLS se corresponden con los centros de los escaneos y 6 dianas distribuidas por la zona de estudio. Las coordenadas de los puntos de control se recogen en la Tabla 3.18 :

Id_Pto	X <sub>LOCAL</sub> [m]	Y <sub>LOCAL</sub> [m]	H <sub>ORTOMÉTRICA</sub> [m]
Scan1	438299.514	4178769.532	585.375
Scan2	438346.680	4178712.226	586.120
Scan3	438440.834	4178629.861	588.828
Scan4	438394.558	4178635.201	589.964
Scan5	438343.828	4178686.292	590.217
Scan6	438310.372	4178724.142	589.631
Scan7	438288.840	4178768.475	586.228

<b>D22</b>	438357.052	4178727.727	579.472
<b>DS1</b>	438392.597	4178626.708	588.534
<b>DS2</b>	438336.524	4178678.078	588.314
<b>DS3</b>	438300.393	4178720.844	587.855
<b>D16</b>	438350.299	4178753.645	577.813
<b>D17</b>	438327.528	4178757.506	578.243

Tabla 3.18. Puntos de Control campaña TLS

### 3.5.3. Preparación de los datos

Es necesaria la exportación de la nube de puntos del instrumento al formato aceptado por el software de tratamiento de datos, en el caso del escáner Leica, se utiliza el formato ptx. La exportación de los escaneos al formato ptx se realizó mediante el software Cyclone (Figura 3.26).

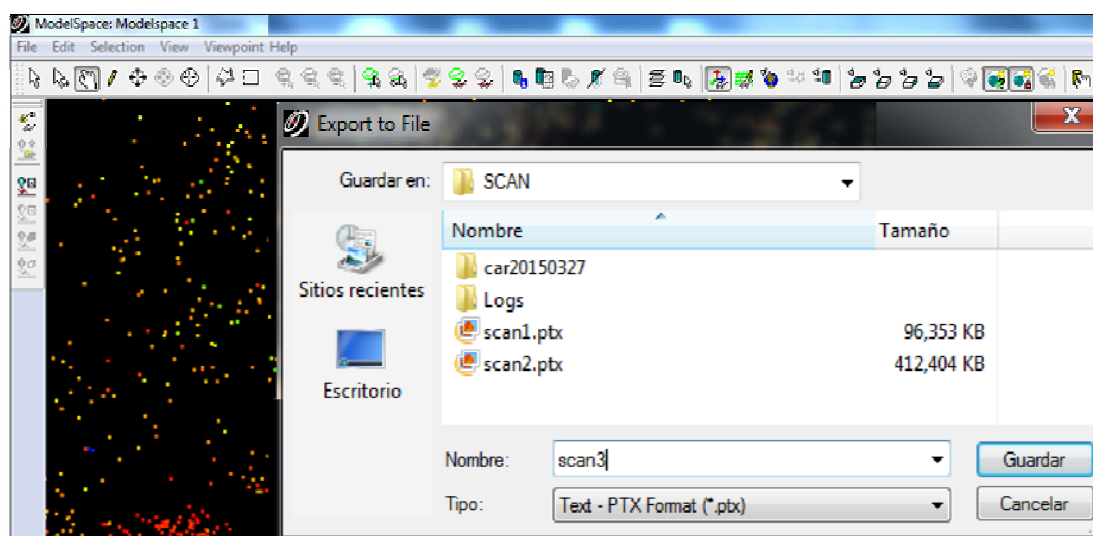


Figura 3.26. Exportación de la nube de puntos a formato .ptx con Cyclone.

Los datos registrados con GPS fueron procesados en el software Leica Geo-Office siguiendo el proceso de manera similar al explicado para el apoyo fotogramétrico (Véase el apartado 2.1.3).

### 3.5.4. Registro y georreferenciación

El método de registro planteado ha sido el denominado “registro mixto”, consistente en el uso de puntos de control externos al dato (dianas y posicionamiento del escáner) y el uso de características propias de la nube de puntos.

Para el tratamiento y procesamiento de datos de escáner se emplea el software Maptek I-site, y el procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- Preparación e importación de los datos
- Translación del origen de cada escaneo a sus coordenadas terreno.
- Cálculo de las desorientaciones y rotación de cada escaneo

Una vez importados los datos en la aplicación, se lleva a cabo la orientación de los escaneos. En primer lugar se trasladaron los orígenes de cada escaneo desde sus coordenadas en el sistema local (0,0,0) hasta las coordenadas terreno (X,Y,Z) obtenidas tras el post-procesado de las observaciones tomadas con GPS (posición del GPS Leica Viva sobre el escáner). A la coordenada Z se le restó el offset vertical del escáner láser (Figura 3.27).

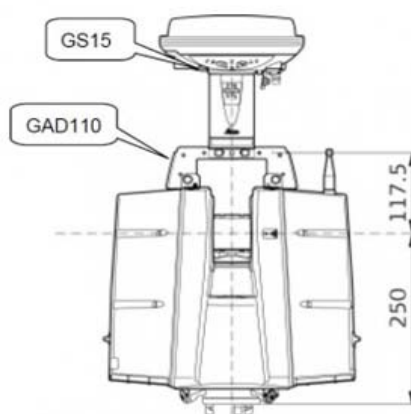


Figura 3.27. Uso del TLS C10 con Antena GS15. Offset Laser Origin= 117.5 mm

La tabla siguiente (Tabla 3.19) recoge las coordenadas de los puntos de control tras el post-procesado.

GPS_SCAN	X [m]	Y [m]	Z [m]	Offset [m]	Z-offset [m]
Scan1	438299.514	4178769.532	585.375	0.1175	585.257
Scan2	438346.680	4178712.226	586.120		586.003
Scan3	438440.834	4178629.861	588.828		588.711
Scan4	438394.558	4178635.201	589.964		589.846
Scan5	438343.828	4178686.292	590.217		590.099
Scan6	438310.372	4178724.142	589.631		589.513
Scan7	438288.840	4178768.475	586.228		586.1101
D16	438350.299	4178753.645	577.813		
D17	438327.528	4178757.506	578.243		
D22	438357.052	4178727.727	579.472		
DS1	438392.597	4178626.708	588.534		
DS2	438336.524	4178678.078	588.314		
DS3	438300.393	4178720.844	587.855		

Tabla 3.19. Coordenadas terreno pertenecientes al apoyo del TLS

Una vez trasladados todos los escaneos al sistema global, es necesario aplicarles las rotaciones adecuadas de modo que los escaneos queden alineados y georreferenciados. Para esto, se calculan las desorientaciones de cada escaneo empleando las coordenadas del origen del escáner y las coordenadas de las dianas medidas (una por cada escaneo).

Los centros de las dianas pueden ser obtenidos por varios métodos:

- ✓ “Ubicar reflector individual ” (herramienta propia del software),
- ✓ Centroide de nube de puntos.
- ✓ Centroide por tramos de anillo.
- ✓ Centro por ajuste de un círculo.
- ✓ Centro por ajuste de un plano (usando todos los puntos seleccionados o únicamente los “mejores puntos”).

En este TFG se han obtenido los centros de las dianas por ajuste de un círculo, método que proporciona el círculo y el centro del mismo (Figura 3.28).

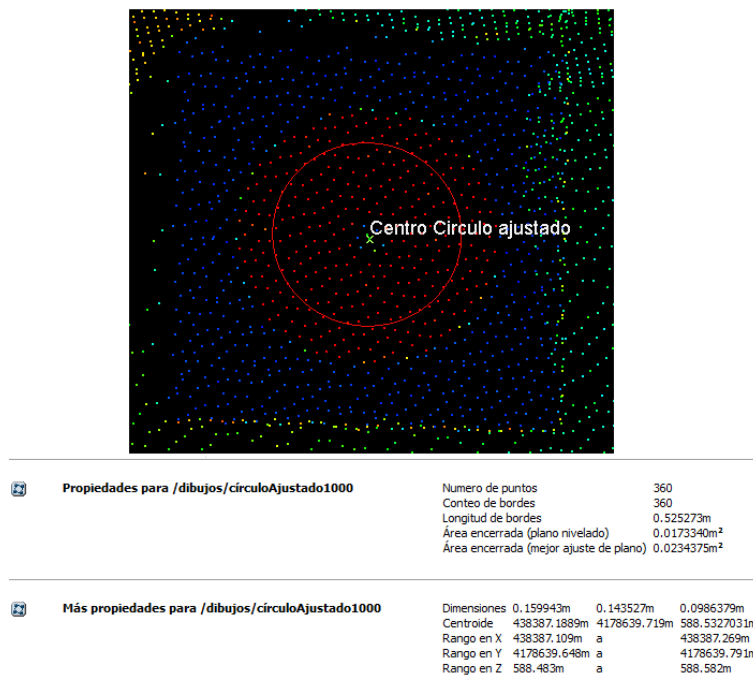


Figura 3.28. Centroide por ajuste de un círculo

Las coordenadas correspondientes a los centros de las dianas en el espacio modelo se muestran en la Tabla 3.20 :

ID	X' [m]	Y' [m]	X[m]	Y[m]
D16	438252.605	4178716.966	438350.299	4178753.645
D17	438269.344	4178765.420	438327.528	4178757.506
D22	438363.804	4178704.670	438357.052	4178727.727
DS1	438392.671	4178626.670	438392.597	4178626.708
DS2	438336.578	4178678.060	438336.524	4178678.078
DS3	438363.727	4178704.670	438300.393	4178720.844
SCAN1			438299.514	4178769.532
SCAN2			438346.680	4178712.226
SCAN3			438440.834	4178629.861
SCAN4			438394.558	4178635.201
SCAN5			438343.828	4178686.292
SCAN6			438310.372	4178724.142
SCAN7			438288.840	4178768.475

Tabla 3.20. Coordenadas modelo (X', Y') y coordenadas terreno (X, Y) de los puntos de control.

Una vez medidas todas las dianas, estamos en disposición de calcular las desorientaciones (Figura 3.29) de manera que los escaneos queden alineados y georreferenciados obteniéndose los ángulos de rotación recogidos en la Tabla 3.21.

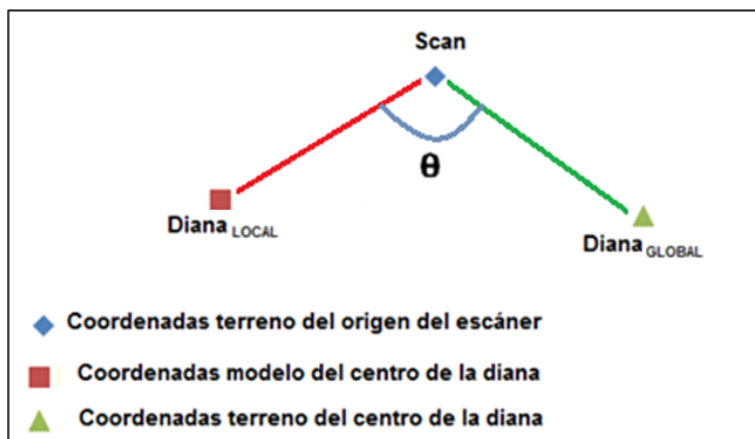


Figura 3.29. Cálculo de los ángulos de rotación

	Ángulos de rotación		
	Scan 1	148°	59'
Scan 2	80°	4'	20"
Scan 3	-	-	-
Scan 4	108°	25'	25"
Scan 5	60°	53'	41"
Scan 6	102°	29'	47"
Scan 7	111°	33'	24"

Tabla 3.21. Ángulos de rotación obtenidos que deben ser aplicados a cada escaneo.

Para el “Scan 3” no se ha obtenido el ángulo de rotación ya que no fue posible medir ninguna diana, no obstante, los solapes existentes entre los escaneos permiten la orientación del mismo.

La Figura 3.30 muestra la posición de los escaneos antes y después de aplicar una rotación igual a la calculada para el escaneo número 7 (Ángulo= 111°33'24”).

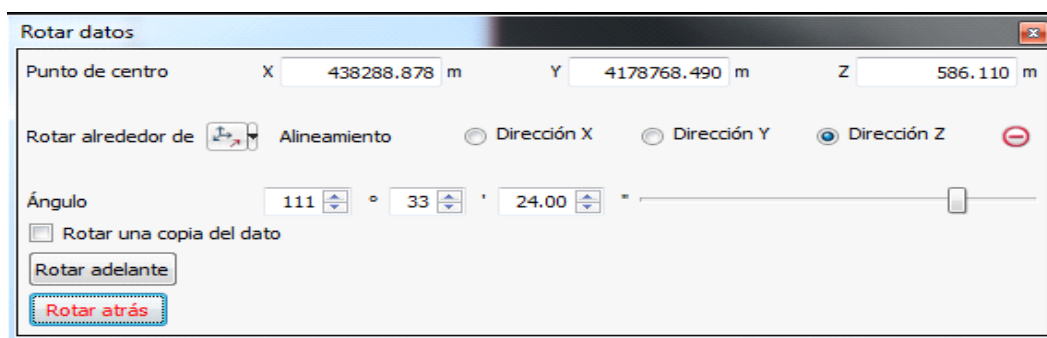
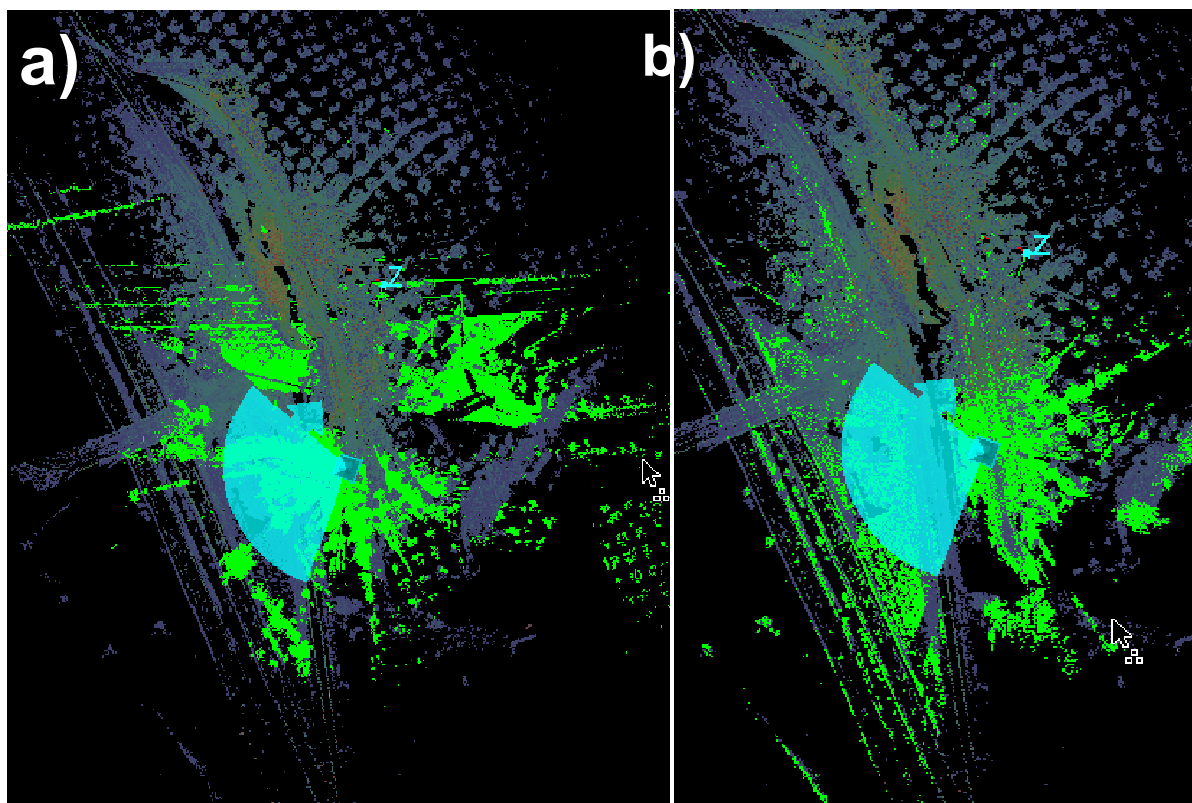


Figura 3.30. Rotación Scan 7 (en color verde), desde su posición en el sistema local (a) a su posición en el sistema de referencia global (b)

Una vez que el modelo está alineado y georreferenciado se aplicó, de forma automática, el factor de escala propio de la proyección UTM (véase apartado 3.3).

Dado que existe, para la misma campaña de observación, un vuelo fotogramétrico mediante UAV, se puede comprobar el error o la distancia entre ambos registros (UAV y TLS). Considerando la nube de puntos del UAV como dato fijo y la correspondiente al escáner como dato a mover, se realiza la orientación por características superficiales obteniendo un error de 0.034 m.

Una vez que las nubes de puntos están fusionadas se procede a eliminar el ruido. Antes de ello, se filtró la nube de puntos procedente del escáner con el polígono que encierra el área ocupada por el vuelo con UAV (Figura 3.31).

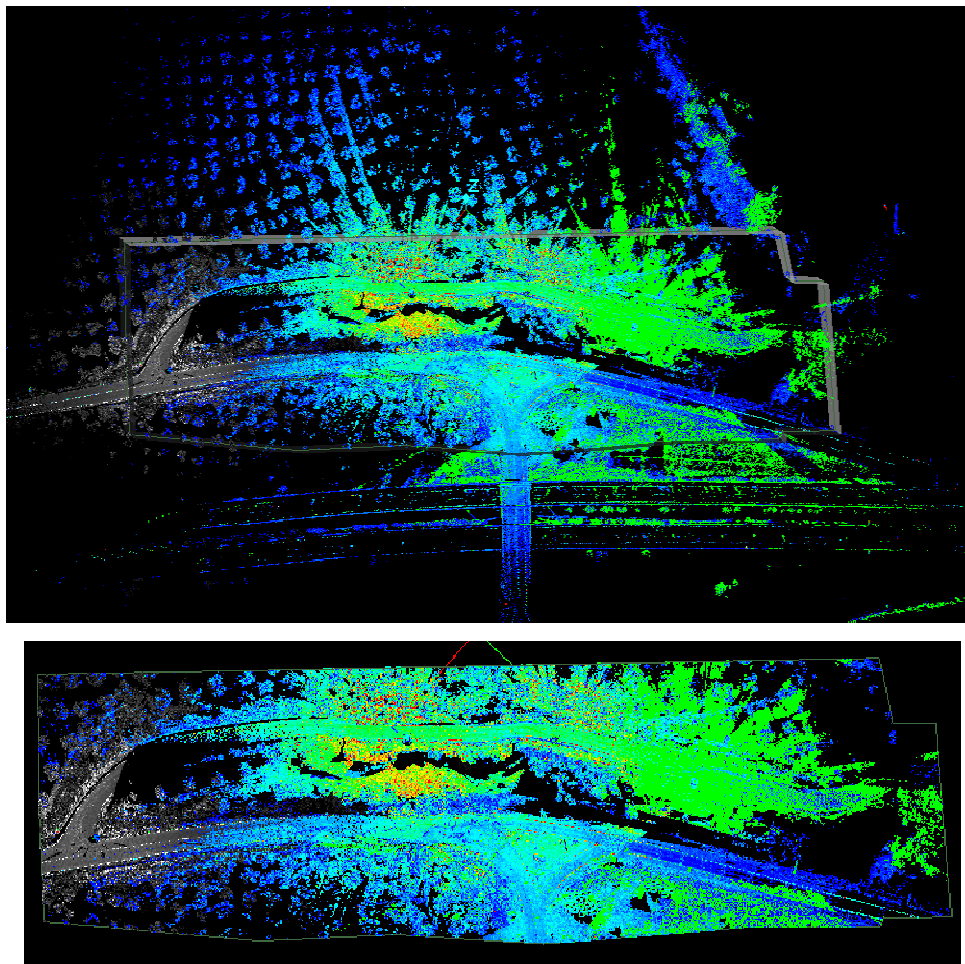


Figura 3.31. Filtrado por polígono de la nube de puntos procedente del TLS. El polígono usado se corresponde con el área analizada con el UAV.

Seguidamente se aplicó un filtrado por proximidad a una superficie, tomando como superficie de referencia la obtenida a partir de la nube de puntos del UAV. De esta manera eliminamos información irrelevante capturada con el TLS tales como señales, vehículos, etc (Figura 3.32). Una vez filtrada la nube de puntos se volvió a coordinar por características superficiales tomando como dato fijo el UAV, obteniéndose en este caso un error de 0.032m, menor que el obtenido anteriormente (0.034m).

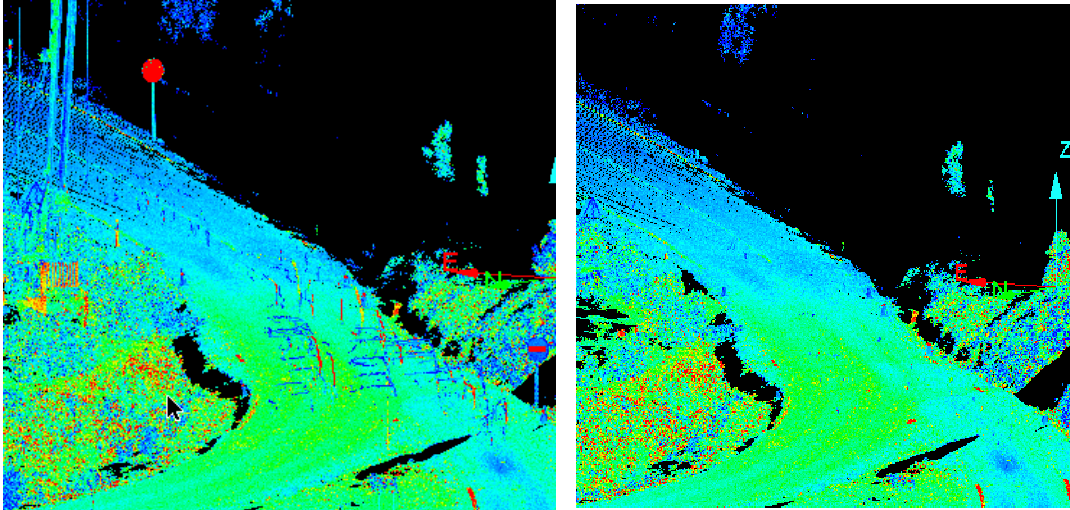


Figura 3.32. Filtrado por proximidad a una superficie

Es importante, además de comprobar este valor numérico, la inspección visual del resultado para comprobar que la operación se ha realizado correctamente.

Este análisis se puede realizar de forma grosera mediante el empleo de colores distintos para cada nube de puntos. Si todo es correcto, en la zona de solape los colores deben fundirse y no prevalecer el uno sobre el otro (Figura 3.33).

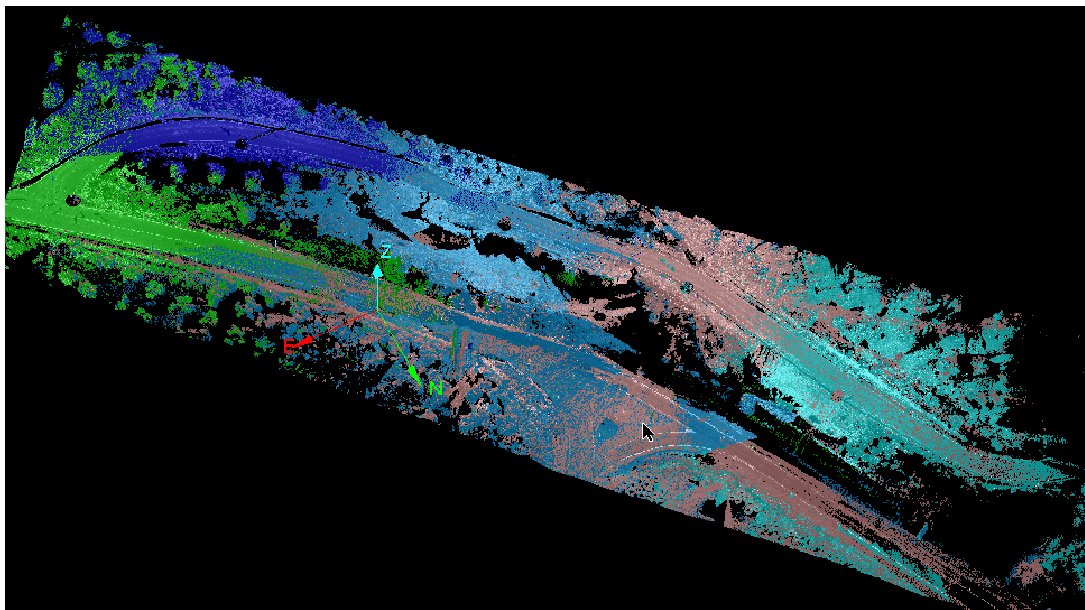


Figura 3.33. Comprobación visual mediante empleo de distintos colores.

Los quitamiedos y líneas de la carretera son elementos artificiales lineales que permiten observar si las nubes de puntos están perfectamente fusionadas ya que cualquier error en la alineación de las nubes es fácilmente detectable (Figura 3.34). Además, otro método para realizar el análisis es mediante el empleo de secciones longitudinales. Si el cálculo ha sido efectuado correctamente, existirá solo una línea, tal y como muestra la Figura 3.35.

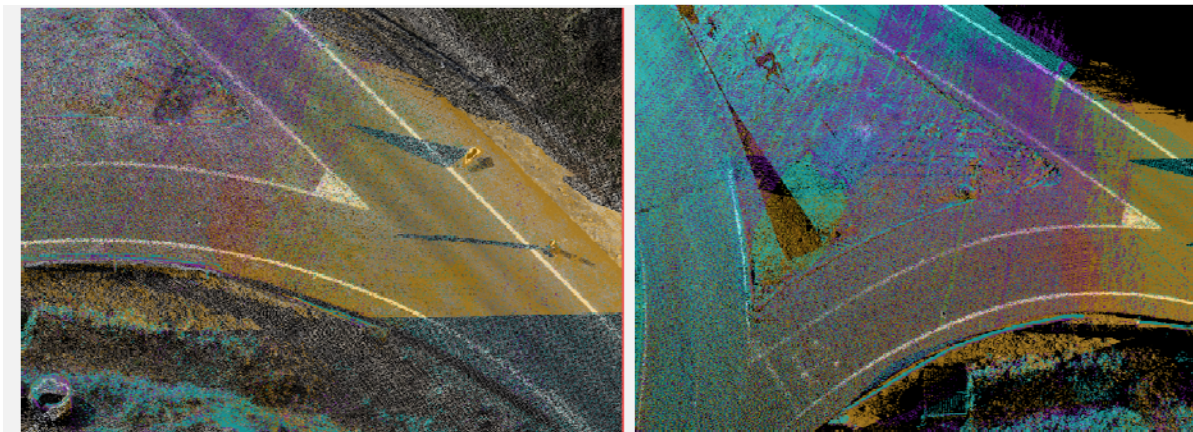


Figura 3.34. Inspección visual mediante líneas de la carretera y quitamiedos.

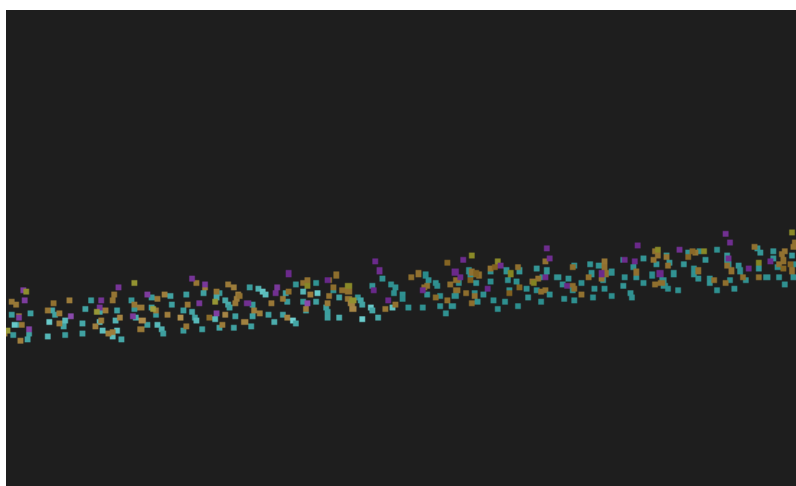


Figura 3.35. Sección longitudinal de la carretera. Los diferentes colores están entremezclados y no se superponen unos a otros, lo cual es indicativo de una fusión correcta de las nubes.

### 3.5.5. Obtención de productos: MDS

Para la obtención de un MDS se ha creado una superficie mediante triangulación topográfica que proyecta los puntos sobre el plano xy (Figura 3.36). Esta triangulación es la que normalmente se utiliza en topografía y presenta el inconveniente a la hora de obtener superficies perpendiculares a este plano o con

ángulos superiores a  $90^\circ$ . Al tratarse de una superficie relativamente llana este inconveniente no afecta, por lo que la triangulación topográfica es idónea.

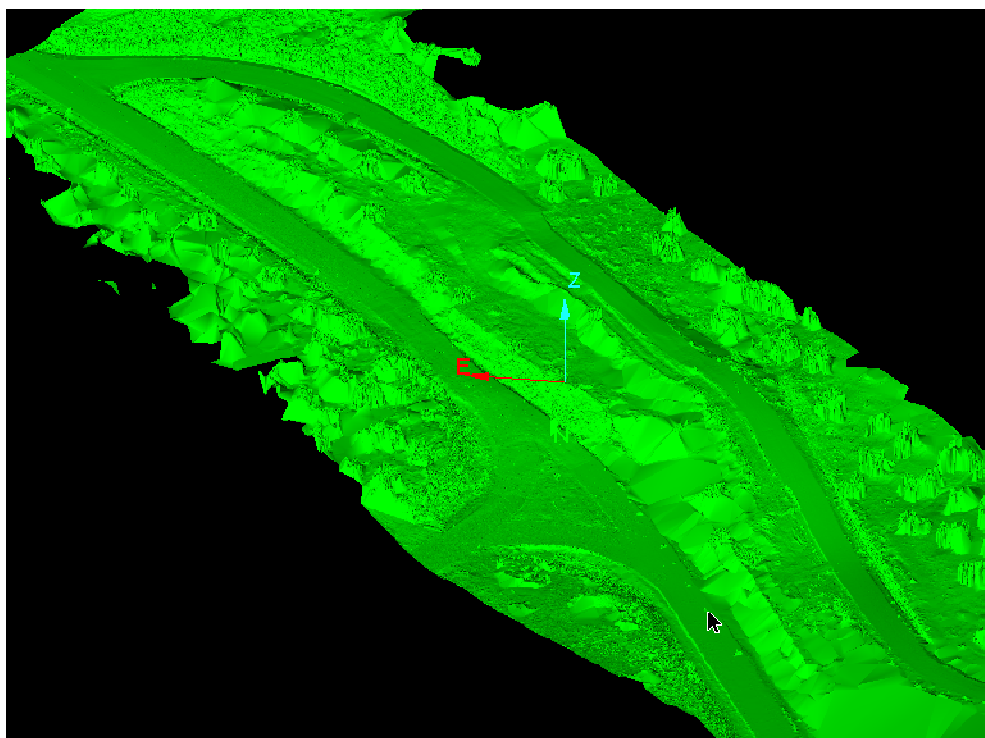


Figura 3.36. Superficie obtenida mediante triangulación topográfica.

### 3.6. Estudio multitemporal. Comparación entre las campañas de observación.

La comparación entre las campañas de observación puede realizarse a partir de los productos descritos anteriormente (MDE y Ortofotografías). Los métodos utilizados en este estudio multitemporal han sido los siguientes:

- **Diferencias entre superficies.** Mediante la herramienta *color* → *distancia entre superficies* del software Maptek I-Site Studio 4.2 se obtiene la diferencia existente entre las superficies correspondientes a dos campañas consecutivas, empleándose la superficie más antigua en el tiempo como superficie base o de referencia. Previamente al empleo de esta herramienta es necesaria la importación de la nube de puntos obtenida con PhotoScan, filtrado de puntos, si es necesario, y la posterior generación de superficies mediante triangulación

topográfica (herramienta del software Maptek I-Site Studio) Figura 3.37.

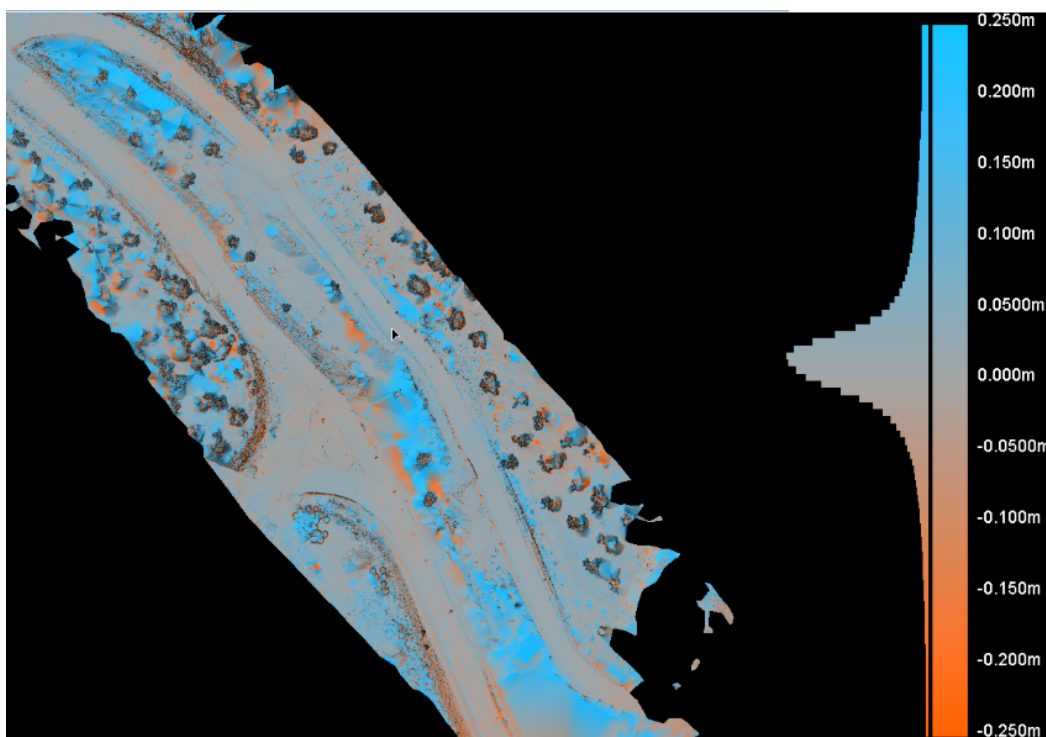


Figura 3.37. Comparación de superficies mediante Maptek I-Site

Como resultado se obtienen mapas de color e histogramas correspondientes a cada una de las campañas. El histograma nos dará una idea de la buena o mala orientación de las campañas a comparar. De esta manera un histograma centrado, nos indica que ambas superficies coinciden. Así mismo, este mapa de color generado nos permitirá percibir los cambios evolutivos sufridos por la carretera. Las zonas en gris son aquellas que no han sufrido cambios.

▪ **Análisis de ortofotografías.** Sobre las ortofotografías es posible realizar medidas de desplazamiento entre objetos relevantes identificados en ellas. Para ello se cargan las ortofotografías y MDT de dos campañas consecutivas en el software Socet Set, permitiendo realizar las medidas de los desplazamientos entre cada dos campañas en 3D (Figura 3.38). También puede realizarse con un SIG como ArcGIS o QGIS.



Figura 3.38. Análisis sobre ortofotografías. Ortofotografías pertenecientes a la campaña 20140117 (izquierda) y 20141223 (derecha). Las líneas amarillas corresponden a la campaña 20140117 apreciándose claramente el desplazamiento.

Los resultados de los métodos empleados para el estudio multitemporal son mostrados y discutidos en el apartado 4.4.

## Capítulo 4

---



## 4. Análisis de resultados y conclusiones

En este capítulo se exponen los análisis realizados a partir de los resultados obtenidos en cada etapa de la aplicación práctica del proyecto, desde la planificación y captura de datos hasta el estudio multitemporal (Figura 4.1).

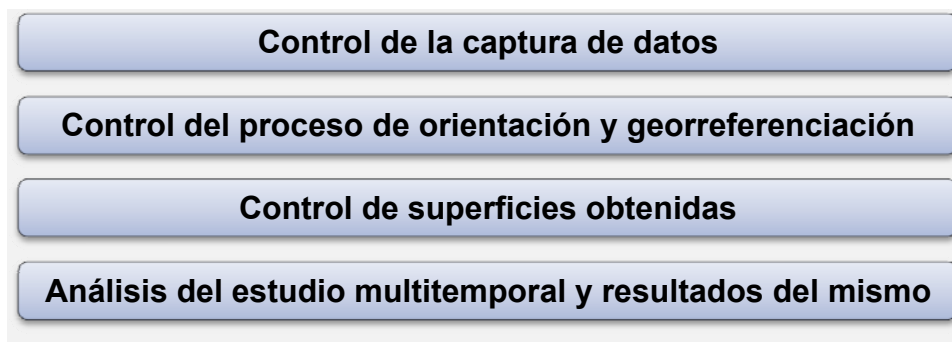


Figura 4.1. Estructura del apartado de Análisis de resultados.

Así mismo, en este apartado se expondrán las conclusiones generales obtenidas tras el análisis de resultados.

### 4.1. Control de la captura de datos

El análisis relativo a la captura de la información se realiza de manera independiente para cada una de las dos técnicas empleadas.

#### 4.1.1. Técnica UAV

En este apartado se analizará si la captura de datos realizada con el UAV Falcon 8 se ha realizado de acuerdo con la planificación del vuelo. Para ello se compararan las posiciones de los puntos de disparo planificadas con las reales, obteniendo la precisión en el posicionamiento del sistema UAV.

En la Tabla 4.1 y Tabla 4.4 se recogen los datos correspondientes a la planificación de vuelo. Contienen la posición de los puntos de disparo y ángulos de giro de la cámara (ángulos de inclinación y cabeceo).

La Tabla 4.2 y la Tabla 4.5 recogen las coordenadas de los puntos de disparo reales y giros de la cámara, obtenidos de la realización del vuelo con UAV Falcon 8.

El control de la captura de datos mediante UAV pasa por la cuantificación de las variaciones planimétricas y angulares encontradas entre los datos planificados y los obtenidos tras la captura y orientación del bloque. La Tabla 4.3 y la Tabla 4.6 recogen los siguientes resultados:

- Las diferencias entre las coordenadas planimétricas calculadas en la planificación y las obtenidas tras la orientación del bloque fotogramétrico, la media de estas y la desviación estándar de los datos. La desviación estándar nos muestra cuánto varían las coordenadas respecto a la media. De esta manera es posible obtener la precisión en el posicionamiento GPS.
- Las diferencias entre los ángulos de la cámara planificados y los reales, la media de estas y la desviación estándar de las mismas.

• *Campaña 20141223*

Pasada	Imagen	X <sub>0</sub> [m]	Y <sub>0</sub> [m]	Inclinación (*)[°]	Heading [°]
1	DSC01038	438259.569	4178823.485	90	137
	DSC01039	438268.998	4178813.251	90	137
	DSC01040	438278.426	4178803.028	90	137
	DSC01041	438287.864	4178792.805	90	137
	DSC01042	438297.293	4178782.582	90	137
	DSC01043	438306.722	4178772.359	90	137
	DSC01044	438316.160	4178762.124	90	137
	DSC01045	438325.589	4178751.901	90	137
	DSC01046	438335.027	4178741.678	90	137
	DSC01047	438344.456	4178731.455	90	137
	DSC01048	438353.886	4178721.232	90	137
	DSC01049	438363.324	4178711.009	90	137
	DSC01050	438372.753	4178700.775	90	137
	DSC01051	438382.191	4178690.552	90	137
	DSC01052	438391.620	4178680.329	90	137
DSC01053	438401.049	4178670.106	90	137	

	DSC01054	438410.487	4178659.883	90	137
	DSC01055	438419.917	4178649.661	90	137
	DSC01056	438429.346	4178639.427	90	137
	DSC01057	438438.784	4178629.204	90	137
	DSC01058	438448.214	4178618.981	90	137
	DSC01059	438457.652	4178608.758	90	137
2	DSC01060	438434.447	4178587.539	90	137
	DSC01061	438425.018	4178597.762	90	137
	DSC01062	438415.579	4178607.985	90	137
	DSC01063	438406.15	4178618.208	90	137
	DSC01064	438396.712	4178628.431	90	137
	DSC01065	438387.282	4178638.653	90	137
	DSC01066	438377.853	4178648.888	90	137
	DSC01067	438368.415	4178659.111	90	137
	DSC01068	438358.986	4178669.333	90	137
	DSC01069	438349.557	4178679.556	90	137
	DSC01070	438340.119	4178689.779	90	137
	DSC01071	438330.689	4178700.002	90	137
	DSC01072	438321.252	4178710.237	90	137
	DSC01073	438311.822	4178720.46	90	137
	DSC01074	438302.393	4178730.683	90	137
	DSC01075	438292.955	4178740.906	90	137
	DSC01076	438283.526	4178751.129	90	137
	DSC01077	438274.088	4178761.352	90	137
	DSC01078	438264.659	4178771.586	90	137
	DSC01079	438255.23	4178781.809	90	137
	DSC01080	438245.793	4178792.032	90	137
	DSC01081	438236.364	4178802.255	90	137

Tabla 4.1. Datos correspondientes a la planificación del UAV. Campaña 20141223. (\*) Inclinación de la cámara

Pasada	Imagen	X <sub>0</sub> [m]	Y <sub>0</sub> [m]	Inclinación (*) [°]	Heading [°]
1	DSC01038	438258.164	4178820.05	81.49	136.07
	DSC01039	438267.296	4178812.97	80.66	136.40
	DSC01040	438276.720	4178803.04	81.87	134.86
	DSC01041	438286.297	4178792.78	82.92	136.03
	DSC01042	438295.569	4178782.97	83.74	137.08
	DSC01043	438304.759	4178773.15	84.99	139.50
	DSC01044	438314.024	4178762.64	85.50	139.12
	DSC01045	438323.590	4178752.45	85.44	138.86
	DSC01046	438332.461	4178741.78	85.36	137.38
	DSC01047	438341.933	4178731.29	85.66	138.65
	DSC01048	438351.281	4178720.95	86.15	139.89

	DSC01049	438360.629	4178710.74	85.59	138.53
	DSC01050	438369.477	4178700.09	86.36	136.72
	DSC01051	438378.835	4178690.01	86.78	137.50
	DSC01052	438388.523	4178679.67	86.36	135.84
	DSC01053	438397.954	4178669.36	86.63	133.67
	DSC01054	438407.109	4178658.53	85.69	135.42
	DSC01055	438416.836	4178648.43	86.59	137.13
	DSC01056	438426.476	4178638.49	86.18	137.44
	DSC01057	438435.881	4178628.28	86.23	137.13
	DSC01058	438445.653	4178618.33	86.72	136.69
	DSC01059	438455.122	4178608.450	86.34	133.57
2	DSC01060	438436.014	4178586.43	82.95	137.17
	DSC01061	438426.802	4178592.75	84.62	134.40
	DSC01062	438417.45	4178602.31	82.63	131.95
	DSC01063	438406.768	4178611.67	80.11	135.52
	DSC01064	438398.324	4178622.15	78.22	140.63
	DSC01065	438389.598	4178632.37	78.00	137.22
	DSC01066	438380.647	4178642.71	76.52	143.35
	DSC01067	438371.15	4178653.18	74.89	141.98
	DSC01068	438361.747	4178663.24	75.15	141.21
	DSC01069	438352.165	4178673.35	74.26	140.20
	DSC01070	438342.495	4178682.8	73.43	141.00
	DSC01071	438332.993	4178692.83	72.64	140.10
	DSC01072	438323.408	4178703.07	72.20	139.71
	DSC01073	438314.08	4178713.11	70.94	140.20
	DSC01074	438305.38	4178723.51	71.24	143.33
	DSC01075	438295.839	4178733.82	70.08	145.83
	DSC01076	438286.535	4178743.91	71.05	144.82
	DSC01077	438277.411	4178754.65	70.71	144.46
	DSC01078	438267.611	4178764.77	70.80	143.05
	DSC01079	438258.229	4178774.69	70.47	142.32
	DSC01080	438248.749	4178784.54	69.42	141.23
DSC01081	438240.483	4178795.96	70.68	150.12	

Tabla 4.2. Datos reales correspondientes a la campaña 20141223. (\*) Inclinación de la cámara.

Pasada	Imagen	dX [m]	dY [m]	dXY [m]	dI [°]	dH [°]
1	DSC01038	-1.405	-3.435	3.711	-8.51	-0.94
	DSC01039	-1.702	-0.281	1.725	-9.34	-0.60
	DSC01040	-1.706	0.012	1.706	-8.13	-2.14
	DSC01041	-1.567	-0.025	1.567	-7.08	-0.97
	DSC01042	-1.724	0.388	1.767	-6.26	0.08
	DSC01043	-1.963	0.791	2.116	-5.02	2.50
	DSC01044	-2.136	0.516	2.197	-4.51	2.12

	DSC01045	-1.999	0.549	2.073	-4.56	1.85
	DSC01046	-2.566	0.102	2.568	-4.64	0.38
	DSC01047	-2.523	-0.165	2.528	-4.34	1.65
	DSC01048	-2.605	-0.282	2.620	-3.85	2.89
	DSC01049	-2.695	-0.269	2.708	-4.41	1.53
	DSC01050	-3.276	-0.685	3.347	-3.64	-0.28
	DSC01051	-3.356	-0.542	3.399	-3.22	0.50
	DSC01052	-3.097	-0.659	3.166	-3.64	-1.16
	DSC01053	-3.095	-0.746	3.184	-3.37	-3.33
	DSC01054	-3.378	-1.353	3.639	-4.31	-1.58
	DSC01055	-3.081	-1.231	3.318	-3.41	0.13
	DSC01056	-2.870	-0.937	3.019	-3.82	0.44
	DSC01057	-2.903	-0.924	3.047	-3.77	0.13
	DSC01058	-2.561	-0.651	2.642	-3.28	-0.31
	DSC01059	-2.530	-0.308	2.549	-3.66	-3.44
	$\bar{X} =$	<b>-2.488</b>	<b>-0.461</b>	<b>2.664</b>	<b>-4.85</b>	<b>-0.02</b>
	$\sigma =$	<b>0.622</b>	<b>0.875</b>	<b>0.654</b>	<b>1.82</b>	<b>1.72</b>
2	DSC01060	1.567	-1.112	1.921	-7.05	0.17
	DSC01061	1.784	-5.010	5.318	-5.38	-2.60
	DSC01062	1.871	-5.680	5.980	-7.37	-5.05
	DSC01063	0.618	-6.540	6.569	-9.89	-1.48
	DSC01064	1.612	-6.281	6.485	-11.78	3.63
	DSC01065	2.316	-6.282	6.695	-12.00	0.22
	DSC01066	2.794	-6.181	6.783	-13.48	6.35
	DSC01067	2.735	-5.933	6.533	-15.11	4.98
	DSC01068	2.761	-6.093	6.689	-14.85	4.21
	DSC01069	2.608	-6.206	6.732	-15.74	3.20
	DSC01070	2.376	-6.977	7.370	-16.57	4.00
	DSC01071	2.304	-7.177	7.538	-17.36	3.10
	DSC01072	2.156	-7.164	7.481	-17.80	2.71
	DSC01073	2.258	-7.347	7.686	-19.06	3.20
	DSC01074	2.987	-7.176	7.773	-18.76	6.33
	DSC01075	2.884	-7.084	7.649	-19.92	8.83
	DSC01076	3.009	-7.216	7.818	-18.95	7.82
	DSC01077	3.323	-6.705	7.483	-19.29	7.46
	DSC01078	2.952	-6.816	7.428	-19.20	6.05
	DSC01079	2.999	-7.119	7.725	-19.53	5.32
	DSC01080	2.956	-7.491	8.053	-20.58	4.23
	DSC01081	4.119	-6.293	7.521	-19.32	13.12
		$\bar{X} =$	<b>2.500</b>	<b>-6.358</b>	<b>6.874</b>	<b>-15.41</b>
	$\sigma =$	<b>0.730</b>	<b>1.327</b>	<b>1.299</b>	<b>4.64</b>	<b>4.02</b>

Tabla 4.3. Diferencias entre datos de vuelo planificado y real. Campaña 20141223.

La Figura 4.2 muestra de manera visual las diferencias entre los puntos de disparo planificados y los reales.

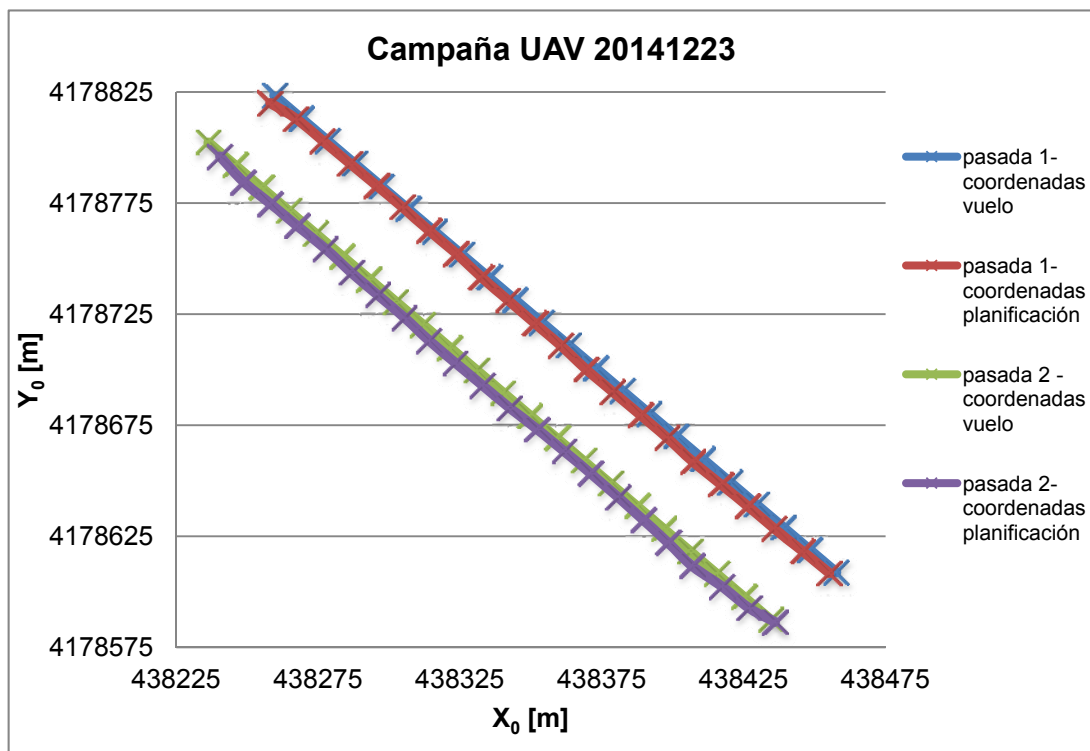


Figura 4.2. Diferencias de coordenadas entre los puntos de toma de imágenes planificados y los obtenidos. Campaña 20141223

- **Campaña 20150327**

Pasada	Imagen	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	Inclinación (*) [°]	Heading [°]
1	DSC01052	438259.569	4178823.485	90	137
	DSC01053	438268.998	4178813.251	90	137
	DSC01054	438278.426	4178803.028	90	137
	DSC01055	438287.864	4178792.805	90	137
	DSC01056	438297.293	4178782.582	90	137
	DSC01057	438306.722	4178772.359	90	137
	DSC01058	438316.160	4178762.124	90	137
	DSC01059	438325.589	4178751.901	90	137
	DSC01060	438335.027	4178741.678	90	137
	DSC01061	438344.456	4178731.455	90	137
	DSC01062	438353.886	4178721.232	90	137
	DSC01063	438363.324	4178711.009	90	137
	DSC01064	438372.753	4178700.775	90	137
	DSC01065	438382.191	4178690.552	90	137
	DSC01066	438391.620	4178680.329	90	137

	DSC01067	438401.049	4178670.106	90	137
	DSC01068	438410.487	4178659.883	90	137
	DSC01069	438419.917	4178649.661	90	137
	DSC01070	438429.346	4178639.427	90	137
	DSC01071	438438.784	4178629.204	90	137
	DSC01072	438448.214	4178618.981	90	137
	DSC01073	438457.652	4178608.758	90	137
2	DSC01074	438434.447	4178587.539	90	137
	DSC01075	438425.018	4178597.762	90	137
	DSC01076	438415.579	4178607.985	90	137
	DSC01077	438406.15	4178618.208	90	137
	DSC01078	438396.712	4178628.431	90	137
	DSC01079	438387.282	4178638.653	90	137
	DSC01080	438377.853	4178648.888	90	137
	DSC01081	438368.415	4178659.111	90	137
	DSC01082	438358.986	4178669.333	90	137
	DSC01083	438349.557	4178679.556	90	137
	DSC01084	438340.119	4178689.779	90	137
	DSC01085	438330.689	4178700.002	90	137
	DSC01086	438321.252	4178710.237	90	137
	DSC01087	438311.822	4178720.46	90	137
	DSC01088	438302.393	4178730.683	90	137
	DSC01089	438292.955	4178740.906	90	137
	DSC01090	438283.526	4178751.129	90	137
	DSC01091	438274.088	4178761.352	90	137
	DSC01092	438264.659	4178771.586	90	137
	DSC01093	438255.23	4178781.809	90	137
	DSC01094	438245.793	4178792.032	90	137
	DSC01095	438236.364	4178802.255	90	137

Tabla 4.4. Datos correspondientes a la planificación del UAV. Campaña 20150327. (\*) Inclinación de la cámara.

Pasada	Imagen	X <sub>0</sub> [m]	Y <sub>0</sub> [m]	Inclinación (*) [°]	Heading [°]
1	DSC01052	438256.191	4178821.01	77.28	133.73
	DSC01053	438262.559	4178815.97	75.22	131.53
	DSC01054	438272.554	4178806.67	76.97	134.70
	DSC01055	438282.013	4178796.51	78.35	134.95
	DSC01056	438291.049	4178786.54	79.56	134.19
	DSC01057	438300.858	4178776.51	80.48	133.03
	DSC01058	438310.249	4178766.32	81.53	133.69
	DSC01059	438319.785	4178756.16	81.14	133.70
	DSC01060	438329.447	4178746.25	81.58	132.89
	DSC01061	438339.175	4178736.56	81.69	133.15

	DSC01062	438349.484	4178726.23	81.28	133.23
	DSC01063	438358.224	4178715.92	81.96	131.98
	DSC01064	438367.424	4178705.68	81.59	132.01
	DSC01065	438376.994	4178695.01	80.93	133.31
	DSC01066	438386.693	4178684.68	81.85	135.18
	DSC01067	438395.975	4178674.53	81.76	132.36
	DSC01068	438405.184	4178664.53	82.10	130.82
	DSC01069	438414.34	4178654.39	82.18	131.14
	DSC01070	438423.774	4178643.73	81.91	131.50
	DSC01071	438433.133	4178633.59	81.25	133.27
	DSC01072	438442.46	4178623.48	82.54	132.61
	DSC01073	438452.441	4178613.22	81.55	131.69
2	DSC01074	438434.357	4178586.77	81.65	135.39
	DSC01075	438430.069	4178589.61	84.55	136.46
	DSC01076	438420.231	4178601.36	81.12	131.25
	DSC01077	438409.956	4178609.38	77.04	130.52
	DSC01078	438400.896	4178619.82	75.57	130.20
	DSC01079	438390.681	4178629.27	75.66	130.08
	DSC01080	438378.45	4178638.63	75.61	132.88
	DSC01081	438367.142	4178648.56	76.44	122.10
	DSC01082	438359.106	4178659.21	74.73	125.43
	DSC01083	438351.087	4178669.57	74.31	131.92
	DSC01084	438343.675	4178680.43	74.60	136.81
	DSC01085	438334.309	4178691.45	73.83	135.44
	DSC01086	438324.959	4178701.01	72.75	136.68
	DSC01087	438315.393	4178711.35	73.19	136.15
	DSC01088	438304.9	4178720.99	72.85	137.18
	DSC01089	438296.547	4178731.55	73.05	138.24
	DSC01090	438287.553	4178742.36	73.13	138.85
	DSC01091	438279.184	4178753.64	72.34	138.49
	DSC01092	438270.755	4178764.61	71.95	141.42
	DSC01093	438261.222	4178775.08	71.79	140.49
	DSC01094	438250.962	4178783.88	72.27	139.26
	DSC01095	438240.641	4178793.57	71.77	133.91

Tabla 4.5. Datos reales correspondientes a la campaña 20150327. (\*) Inclinación de la cámara.

Pasada	Imagen	dX [m]	dY [m]	dXY [m]	dI [°]	dH [°]
1	DSC01052	-3.378	-2.480	4.191	-12.72	-3.27
	DSC01053	-6.439	2.722	6.991	-14.79	-5.47
	DSC01054	-5.872	3.646	6.912	-13.03	-2.30
	DSC01055	-5.851	3.703	6.924	-11.65	-2.05
	DSC01056	-6.244	3.958	7.393	-10.44	-2.81
	DSC01057	-5.864	4.151	7.185	-9.53	-3.97

	DSC01058	-5.911	4.196	7.249	-8.47	-3.31
	DSC01059	-5.804	4.256	7.197	-8.86	-3.30
	DSC01060	-5.580	4.569	7.212	-8.42	-4.11
	DSC01061	-5.281	5.100	7.342	-8.31	-3.85
	DSC01062	-4.402	4.993	6.656	-8.72	-3.77
	DSC01063	-5.100	4.906	7.077	-8.04	-5.02
	DSC01064	-5.329	4.903	7.241	-8.41	-4.99
	DSC01065	-5.197	4.462	6.850	-9.07	-3.69
	DSC01066	-4.927	4.352	6.574	-8.15	-1.82
	DSC01067	-5.074	4.420	6.729	-8.24	-4.64
	DSC01068	-5.303	4.651	7.054	-7.90	-6.18
	DSC01069	-5.577	4.731	7.313	-7.82	-5.86
	DSC01070	-5.572	4.299	7.038	-8.09	-5.50
	DSC01071	-5.651	4.388	7.155	-8.75	-3.73
	DSC01072	-5.754	4.498	7.303	-7.46	-4.39
	DSC01073	-5.211	4.460	6.859	-8.45	-5.31
	$\bar{X} =$	<b>-5.424</b>	<b>4.040</b>	<b>6.929</b>	<b>-9.33</b>	<b>-4.06</b>
	$\sigma =$	<b>0.645</b>	<b>1.547</b>	<b>0.653</b>	<b>1.96</b>	<b>1.22</b>
2	DSC01074	-0.090	-0.767	0.772	-8.36	-1.61
	DSC01075	5.051	-8.152	9.590	-5.45	-0.54
	DSC01076	4.652	-6.624	8.094	-8.88	-5.75
	DSC01077	3.806	-8.827	9.613	-12.96	-6.48
	DSC01078	4.184	-8.614	9.576	-14.43	-6.80
	DSC01079	3.399	-9.386	9.982	-14.34	-6.93
	DSC01080	0.597	-10.258	10.275	-14.39	-4.12
	DSC01081	-1.273	-10.551	10.628	-13.56	-14.90
	DSC01082	0.120	-10.122	10.123	-15.27	-11.57
	DSC01083	1.530	-9.988	10.105	-15.69	-5.08
	DSC01084	3.556	-9.347	10.001	-15.41	-0.19
	DSC01085	3.620	-8.552	9.287	-16.17	-1.57
	DSC01086	3.707	-9.225	9.942	-17.25	-0.32
	DSC01087	3.571	-9.111	9.786	-16.81	-0.85
	DSC01088	2.507	-9.694	10.013	-17.15	0.18
	DSC01089	3.592	-9.352	10.018	-16.95	1.24
	DSC01090	4.027	-8.765	9.646	-16.87	1.85
	DSC01091	5.096	-7.708	9.240	-17.66	1.49
	DSC01092	6.096	-6.976	9.264	-18.06	4.41
	DSC01093	5.992	-6.725	9.007	-18.22	3.49
	DSC01094	5.169	-8.157	9.657	-17.73	2.26
	DSC01095	4.277	-8.682	9.678	-18.23	-3.09
	$\bar{X} =$	<b>3.327</b>	<b>-8.436</b>	<b>9.286</b>	<b>-14.99</b>	<b>-2.49</b>
	$\sigma =$	<b>1.991</b>	<b>2.029</b>	<b>1.971</b>	<b>3.43</b>	<b>4.83</b>

Tabla 4.6. Diferencias entre datos de vuelo planificado y real. Campaña 20150327.

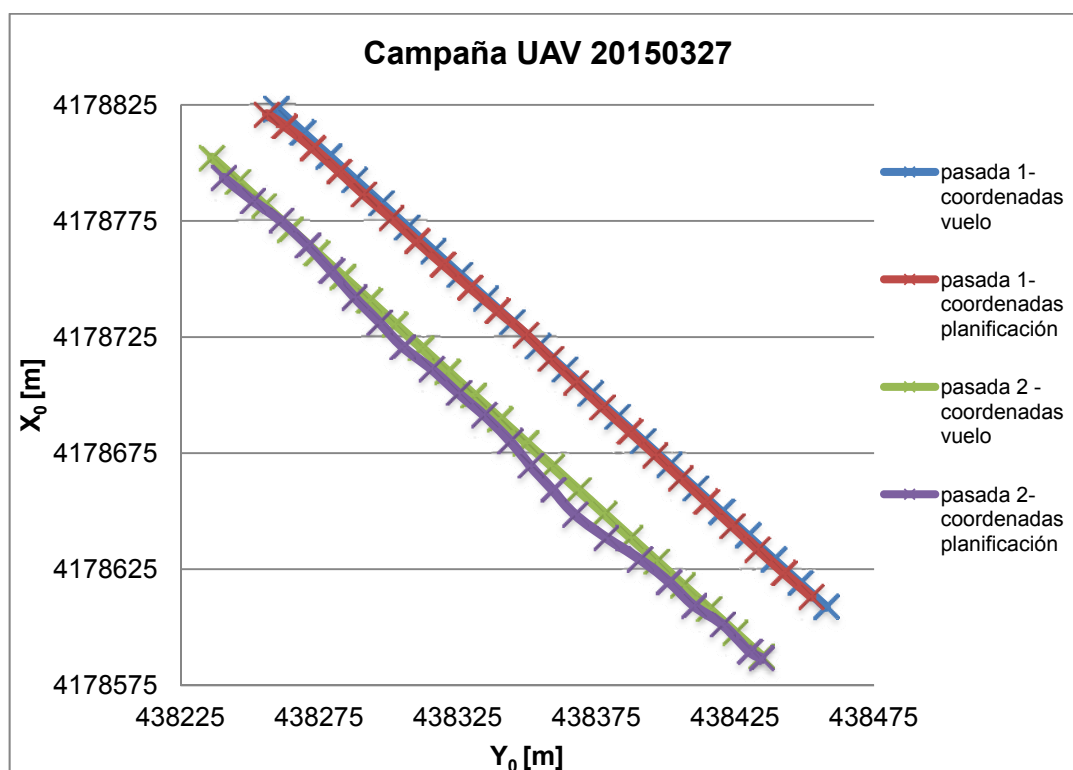


Figura 4.3. Diferencias de coordenadas entre los puntos de toma de imágenes planificados y los obtenidos. Campaña 20150327

Los resultados del análisis del posicionamiento planimétrico muestran un sesgo respecto a lo planificado, siendo este más importante en la coordenada Y que en la coordenada X. No obstante las desviaciones estándar obtenidas son pequeñas (teniendo en cuenta el tipo de GPS que se monta sobre estos sistemas UAV), estando en torno a 1.5 m. Así mismo, se puede observar que la posición no varía en exceso una vez inicializada la posición. Por tanto se puede decir que el error planimétrico es más o menos constante a lo largo del vuelo a excepción del error de inicialización.

Por otro lado se puede decir que el vuelo es angularmente estable ya que las desviaciones estándar están entre 1 y 5 grados sexagesimales. Los valores anómalos coinciden casi siempre con las primeras posiciones de disparo y cambios entre pasadas debido, posiblemente, a que el sensor no llega a alcanzar su posición dentro de las tolerancias fijadas. Las rachas de viento durante la ejecución del vuelo pueden ser otra causa de dichas anomalías.

Para la posición altimétrica se estima la variación en altura (dZ) de cada punto de disparo (real) con respecto a la media correspondiente, así como su

desviación estándar (Tabla 4.7 y Tabla 4.8). El motivo de separar la planimetría de la altimetría es debido a que el UAV utiliza posicionamiento GPS para su posicionamiento en longitud y latitud, mientras que para la altimetría utiliza un sistema basado en variación de presión relativa al punto de despegue.

- *Campaña 20141223*

Pasada	Imagen	Z0 [m]	dZ [°]	Pasada	Imagen	Z0 [m]	dZ [°]
1	DSC01038	626.431	-0.672	2	DSC01060	625.910	0.322
	DSC01039	626.677	-0.426		DSC01061	624.991	-0.597
	DSC01040	627.088	-0.015		DSC01062	624.999	-0.589
	DSC01041	627.550	0.447		DSC01063	625.212	-0.376
	DSC01042	627.433	0.330		DSC01064	625.170	-0.418
	DSC01043	627.479	0.376		DSC01065	625.294	-0.294
	DSC01044	627.517	0.414		DSC01066	625.170	-0.418
	DSC01045	627.483	0.380		DSC01067	625.326	-0.262
	DSC01046	627.501	0.398		DSC01068	625.441	-0.147
	DSC01047	627.427	0.324		DSC01069	625.557	-0.031
	DSC01048	627.326	0.223		DSC01070	625.582	-0.006
	DSC01049	627.352	0.249		DSC01071	625.729	0.141
	DSC01050	627.370	0.267		DSC01072	626.205	0.617
	DSC01051	627.216	0.113		DSC01073	626.030	0.442
	DSC01052	627.089	-0.014		DSC01074	626.020	0.432
	DSC01053	626.961	-0.142		DSC01075	625.843	0.255
	DSC01054	626.923	-0.180		DSC01076	626.006	0.418
	DSC01055	626.807	-0.296		DSC01077	625.670	0.082
	DSC01056	626.777	-0.326		DSC01078	625.500	-0.088
	DSC01057	626.719	-0.384		DSC01079	625.458	-0.130
DSC01058	626.652	-0.451	DSC01080	625.518	-0.070		
DSC01059	626.491	-0.612	DSC01081	626.305	0.717		
		$\bar{X}=627.103$	$MAX=0.447$			$\bar{X}=625.588$	$MAX=0.717$
		$\sigma = 0.367$				$\sigma = 0.381$	

Tabla 4.7. Variación en altura (dZ) de cada punto de disparo con respecto a la media ( $\bar{X}$ ), así como su desviación estándar ( $\sigma$ ). Campaña 20141223

- *Campaña 20150327*

Pasada	Imagen	Z0 [m]	dZ [°]	Pasada	Imagen	Z0 [m]	dZ [°]
1	DSC01052	627.695	0.592	2	DSC01074	627.906	2.318
	DSC01053	627.846	0.743		DSC01075	627.220	1.632
	DSC01054	627.899	0.796		DSC01076	626.424	0.836
	DSC01055	627.993	0.890		DSC01077	626.769	1.181
	DSC01056	628.100	0.997		DSC01078	626.868	1.280
	DSC01057	628.387	1.284		DSC01079	627.028	1.440
	DSC01058	628.608	1.505		DSC01080	626.705	1.117
	DSC01059	628.659	1.556		DSC01081	627.135	1.547
	DSC01060	628.651	1.548		DSC01082	627.123	1.535
	DSC01061	628.584	1.481		DSC01083	626.873	1.285
	DSC01062	628.646	1.543		DSC01084	626.622	1.034
	DSC01063	628.905	1.802		DSC01085	626.463	0.875
	DSC01064	628.757	1.654		DSC01086	626.442	0.854
	DSC01065	628.604	1.501		DSC01087	626.483	0.895
	DSC01066	628.331	1.228		DSC01088	626.602	1.014
	DSC01067	628.400	1.297		DSC01089	626.648	1.060
	DSC01068	628.538	1.435		DSC01090	626.550	0.962
	DSC01069	628.671	1.568		DSC01091	626.237	0.649
	DSC01070	628.724	1.621		DSC01092	626.145	0.557
	DSC01071	628.672	1.569		DSC01093	626.051	0.463
DSC01072	628.690	1.587	DSC01094	626.096	0.508		
DSC01073	628.755	1.652	DSC01095	626.335	0.747		
	$\bar{X} = 628.460$	<b>MAX= 1.802</b>		$\bar{X} = 626.669$	<b>MAX= 2.318</b>		
	$\sigma = 0.339$			$\sigma = 0.435$			

Tabla 4.8. Variación en altura (dZ) de cada punto de disparo con respecto a la media ( $\bar{X}$ ), así como su desviación estándar ( $\sigma$ ). Campaña 20150327

En vista de los resultados anteriores se puede decir que la ejecución del vuelo se ha realizado conforme a la planificación, permitiendo mantener los recubrimientos y escala planificados, cumpliendo así los condicionantes geométricos del vuelo.

Finalmente y como se puede observar en la Figura 4.2 y en la Figura 4.3, no se han producido deficiencias en la captura dado que se han capturado todas las imágenes planificadas.

### 4.1.2. Técnica TLS

La captura de los datos TLS se realizó conforme a lo planificado, respetando las posiciones de estacionamiento del escáner láser y ángulos de barrido planificados. Sin embargo, fue necesaria la realización de un séptimo escaneo ya que desde la estación nº 1 no fue posible escanear ambos lados de la carretera por no ser visibles desde esa posición.

La toma de datos de acuerdo con la planificación garantiza el solape necesario entre los distintos escaneos. No obstante, es importante llevar a cabo un control en campo tras la realización de cada escaneo con el fin de comprobar que los datos han sido correctamente registrados.

## 4.2. Control del proceso de orientación y georreferenciación de los datos

### 4.2.1. Técnica UAV

El control del proceso de orientación se lleva a cabo mediante el análisis del error medio cuadrático de los puntos de control una vez realizada la orientación. Para llevar a cabo este control, se han remplazado algunos puntos de control (situados en el centro del bloque) por puntos de comprobación o check points. Los resultados obtenidos tras llevar este control para ambas campañas se recogen en la tablas siguientes.

- **Campaña 20141223**

ID	X <sub>PC</sub> [m]	Y <sub>PC</sub> [m]	Z <sub>PC</sub> [m]	X <sub>CP</sub> [m]	Y <sub>CP</sub> [m]	Z <sub>CP</sub> [m]	ΔX [cm]	ΔY [cm]	ΔZ [cm]
D13	438327.192	4178756.030	578.301	438327.181	4178756.010	578.282	1.1	1.8	1.9
D14	438352.697	4178715.570	580.923	438352.693	4178715.540	580.927	0.4	2.3	0.4
D19	438337.970	4178685.730	588.402	438337.966	4178685.740	588.398	0.3	-1.0	0.4
D20	438303.062	4178725.960	587.547	438303.070	4178725.970	587.515	-0.8	-0.4	3.2

Tabla 4.9. Coordenadas de los puntos de control (PC), coordenadas de los puntos de comprobación (CP) y diferencias entre ambas. Campaña 20141223

RMS	$\sigma_x$ [m]	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_z$ [m]	$\sigma_{TOTAL}$ [m]
	0.008	0.016	0.014	0.022

Tabla 4.10. Valores estadísticos resultantes del control del proceso de orientación del bloque fotogramétrico. Campaña 20141223.

- **Campaña 20150327**

ID	$X_{PC}$ [m]	$Y_{PC}$ [m]	$Z_{PC}$ [m]	$X_{CP}$ [m]	$Y_{CP}$ [m]	$Z_{CP}$ [m]	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]	$\Delta Z$ [cm]
D17	438327.528	4178757.506	578.242	438327.516	4178757.515	578.247	1.2	-0.9	-0.5
D15	438351.429	4178716.952	580.896	438351.408	4178716.941	580.910	2.1	1.1	-1.4
D4	438305.756	4178753.488	584.808	438305.754	4178753.476	584.797	0.2	1.2	1.1
D6	438331.887	4178700.270	588.256	438331.893	4178700.285	588.244	-0.6	-1.5	1.2

Tabla 4.11. Coordenadas de los puntos de control (PC), coordenadas de los puntos de comprobación (CP) y diferencias entre ambas. Campaña 20150327.

RMS	$\sigma_x$ [m]	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_z$ [m]	$\sigma_{TOTAL}$ [m]
	0.012	0.014	0.013	0.021

Tabla 4.12. Valores estadísticos resultantes del control del proceso de orientación del bloque fotogramétrico. Campaña 20150327.

En ambas campañas se obtuvo un error máximo en la orientación del bloque fotogramétrico entorno a 2 cm. Los puntos de control están medidos con una precisión media de 2 cm y el tamaño del GSD está en torno a unos 1.5 cm, por lo tanto los datos obtenidos son correctos en cuanto a los requisitos exigidos para este trabajo.

Un aspecto a tener en cuenta con el fin de evitar extrapolaciones en el cálculo del proceso de orientación es la adecuada distribución de los puntos de control. El área encerrada por los puntos de control debe ser máxima, cubriendo de manera completa la zona de estudio.

#### 4.2.2. Técnica TLS

Para el proceso de registro y georreferenciación de datos procedentes de la técnica TLS se han utilizado los siete puntos de estacionamiento y las dianas colocadas con el fin de asegurar una correcta orientación de los escaneos.

La calidad de la orientación se puede comprobar a partir de la diferencia entre las coordenadas de los puntos de control obtenidas mediante GNSS ( $X_T$ ,  $Y_T$ ,  $Z_T$ ) y las coordenadas de los mismos tras la transformación 3D rígida ( $X_M$ ,  $Y_M$ ,  $Z_M$ ). (Tabla 4.13).

Scan	$X_T$ [m]	$Y_T$ [m]	$Z_T$ [m]	$X_M$ [m]	$Y_M$ [m]	$Z_M$ [m]	$\Delta_x$ [cm]	$\Delta_y$ [cm]	$\Delta_z$ [cm]
1	438299.555	4178769.548	585.257	438299.533	4178769.523	585.241	-2.2	-2.5	-1.7
2*	438346.738	4178712.222	586.003	438346.727	4178712.158	585.997	-1.1	-6.4	-0.6
3	438440.925	4178629.828	588.711	438440.917	4178629.843	588.714	-0.9	1.5	0.3
4	438394.633	4178635.170	589.846	438394.632	4178635.179	589.856	-0.1	1.0	1.0
5	438343.885	4178686.279	590.099	438343.892	4178686.298	590.105	0.7	1.9	0.5
6	438310.418	4178724.142	589.513	438310.432	4178724.163	589.516	1.4	2.1	0.3
7	438288.878	4178768.491	586.110	438288.899	4178768.517	586.112	2.2	2.6	0.2

Tabla 4.13. Coordenadas terreno de los PC obtenidas mediante GNSS, coordenadas modelo de los PC y diferencias entre ambas.\* Este dato no se tiene en cuenta para el cálculo de los valores estadísticos por tratarse de un error grosero.

En la Tabla 4.14 se muestran los valores medios de dicho análisis.

RMS	$\sigma_x$ [m]	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_z$ [m]	$\sigma_{TOTAL}$ [m]
	0.016	0.018	0.009	0.026

Tabla 4.14. Valores estadísticos de los PC, en el ajuste del TLS

Al igual que en el de caso de la fotogrametría, es importante la correcta distribución de los puntos de control.

### 4.3. Control de superficies

Adicionalmente se ha realizado un análisis a partir de las superficies. Para ello se ha recurrido al cálculo de distancia entre los puntos de control con respecto al MDS generado por ambas técnicas.

#### 4.3.1. UAV

Para el estudio de la superficie generada a partir de técnicas fotogramétricas se ha empleado la totalidad de los puntos de control que fueron utilizados durante la captura de datos con UAV Falcon 8. Los resultados obtenidos se muestran en

la Tabla 4.15 y la Tabla 4.16 para las campañas 20141223 y 20150327 correspondientemente.

ID	D [m]
D1	-0.008
D2	-0.009
D3	0.015
D4	0.018
D5	0.018
D6	0.000
D7	0.043
D8	-0.012
D9	0.016
D10	0.027
D11	-0.010
D12	0.014
D13	0.019
D14	0.004
D15	0.006
D16	0.013
D17	-0.012
D18	0.002
D19	0.016
D20	0.043
D21	0.017
D22	0.011
<b>Máx [m]</b>	<b>0.043</b>
<b>Min [m]</b>	<b>-0.012</b>
<b>Prom [m]</b>	<b>0.011</b>
<b><math>\sigma</math>[m]</b>	<b>0.016</b>

Tabla 4.15. Control Superficie UAV. Campaña 20141223

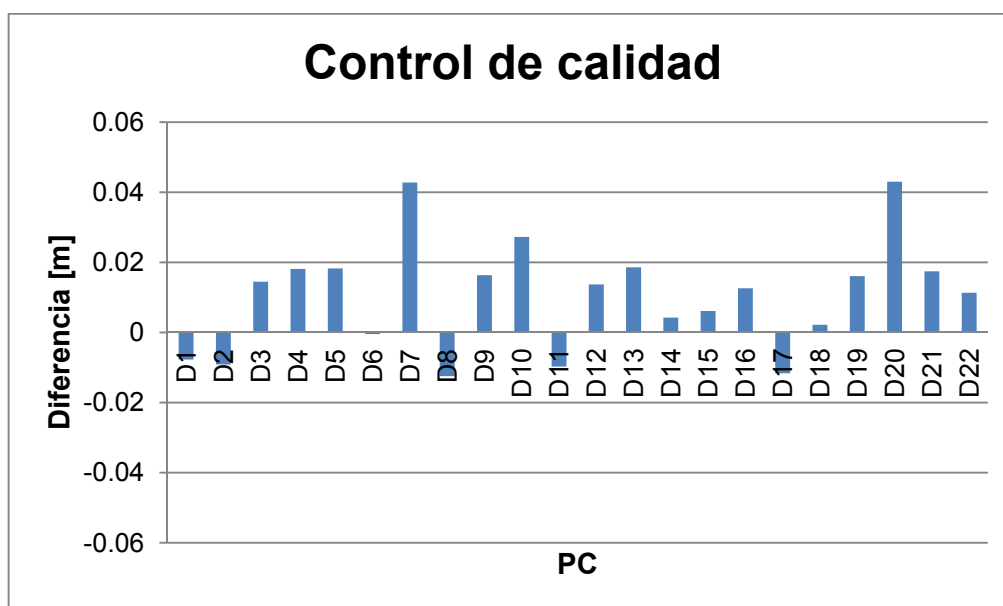


Figura 4.4. Control de Calidad de la superficie mediante PC. Campaña 20141223

ID	D [m]
D2	0.012
D3	0.041
D4	0.023
D5	0.047
D6	0.031
D7	0.022
D8	0.007
D10	0.017
D11	0.018
D12	0.036
D13	0.027
D14	0.023
D15	0.007
D16	-0.008
D17	0.004
D18	-0.004
D19	-0.019
D21	-0.029
D22	0.011
<b>Máx [m]</b>	<b>0.047</b>
<b>Min [m]</b>	<b>-0.029</b>
<b>Prom [m]</b>	<b>0.014</b>
<b><math>\sigma</math>[m]</b>	<b>0.020</b>

Tabla 4.16. Control Superficie UAV. Campaña 20150327

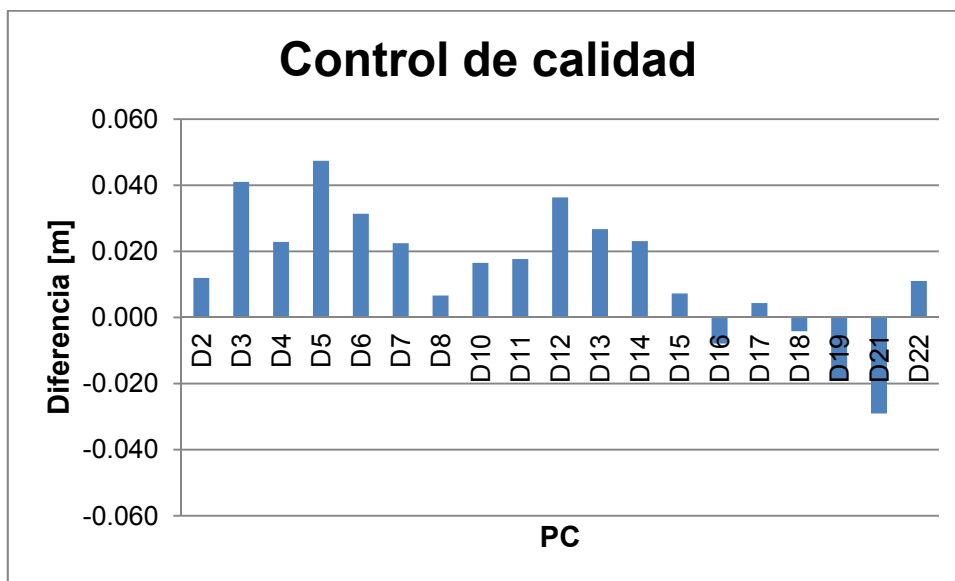


Figura 4.5. Control de Calidad de la superficie mediante PC. Campaña 20150327

#### 4.3.2. TLS

Para llevar a cabo el control de calidad de la superficie generada con datos procedentes del escáner láser se han empleado también los Puntos de Control medidos para la orientación del vuelo fotogramétrico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.17.

ID	D [m]
D2	-0.016
D3	0.016
D4	-0.014
D5	-0.006
D6	-0.008
D7	-0.015
D8	-0.022
D10	0.004
D11	-0.009
D12	0.007
D13	0.025
D14	-0.003
D15	-0.003
D16	-0.004
D17	0.004
D18	0.001
D19	-0.012
D21	-0.013
D22	0.009

Máx [m]	0.025
Min [m]	-0.022
Prom [m]	-0.003
$\sigma$ [m]	0.012

Tabla 4.17. Control Superficie TLS. Campaña 20150327

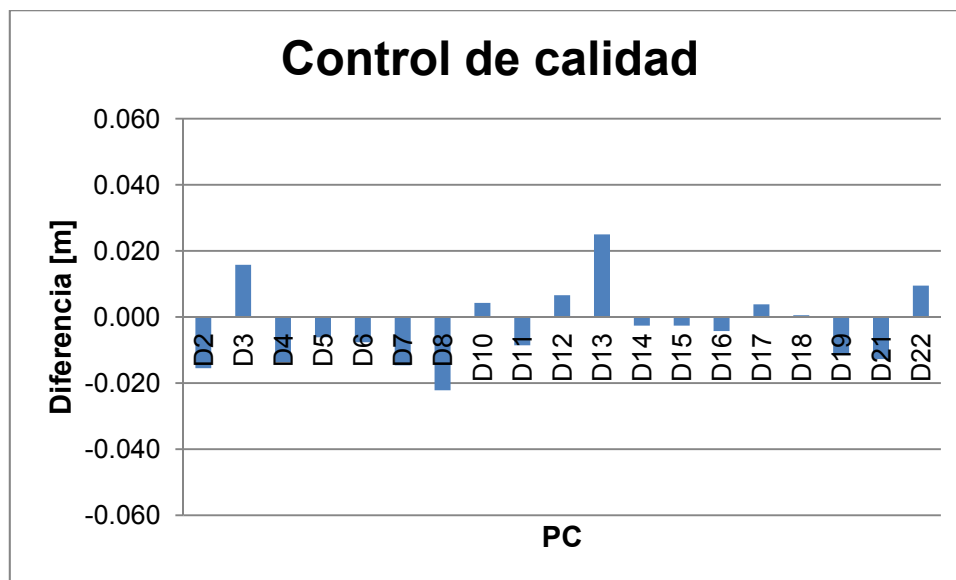


Figura 4.6. Control de Calidad de la superficie mediante PC. Campaña TLS 20150327

El punto de control con más error que chequea la superficie fotogramétrica se encuentra a unos 4.7 cm de distancia y la desviación estándar obtenida es de 2 cm. Para la superficie TLS se ha obtenido una distancia máxima a la superficie de 2.5 cm y una desviación estándar de 1.2 cm. En cualquier caso, estos residuos son acordes con las precisiones alcanzadas con ambos métodos.

#### 4.4. Análisis del estudio multitemporal y los resultados del mismo

Para llevar a cabo un estudio multitemporal es necesario disponer de datos que representen el objeto, tomados en diferentes fechas.

En este proyecto, existen tres campañas. Los datos de la primera de ellas han sido facilitados por el grupo de investigación SFT de la Universidad de Jaén y se corresponde con una campaña de campo de UAV con fecha 17/01/2014. Las

otras dos campañas, realizadas para el desarrollo de este proyecto y ya tratadas en apartados previos, se realizaron los días 23/12/2014 y 27/03/2015.

#### 4.4.1. Estudio sobre MDS

Para realizar el estudio se comparan los MDS obtenidos de las distintas épocas en las que se han tomado los datos.

El software MaptekI-site permite calcular la distancia normal entre superficies, obteniendo como resultado un mapa de color, apareciendo en naranja aquellas zonas donde el MDS descende (pérdida de material) respecto de la superficie de referencia; en azul las zonas donde el MDS asciende (acumulación), en gris las áreas sin cambios apreciables y en verde las zonas con cambios fuera de rango debido a que no aparecen en ambas representaciones o están por encima del umbral marcado que en este caso ha sido de 0.25 m.

A continuación se muestran los mapas de color resultado de la comparación entre las distintas campañas realizadas con UAV y que representan el objeto de estudio en distintas épocas.

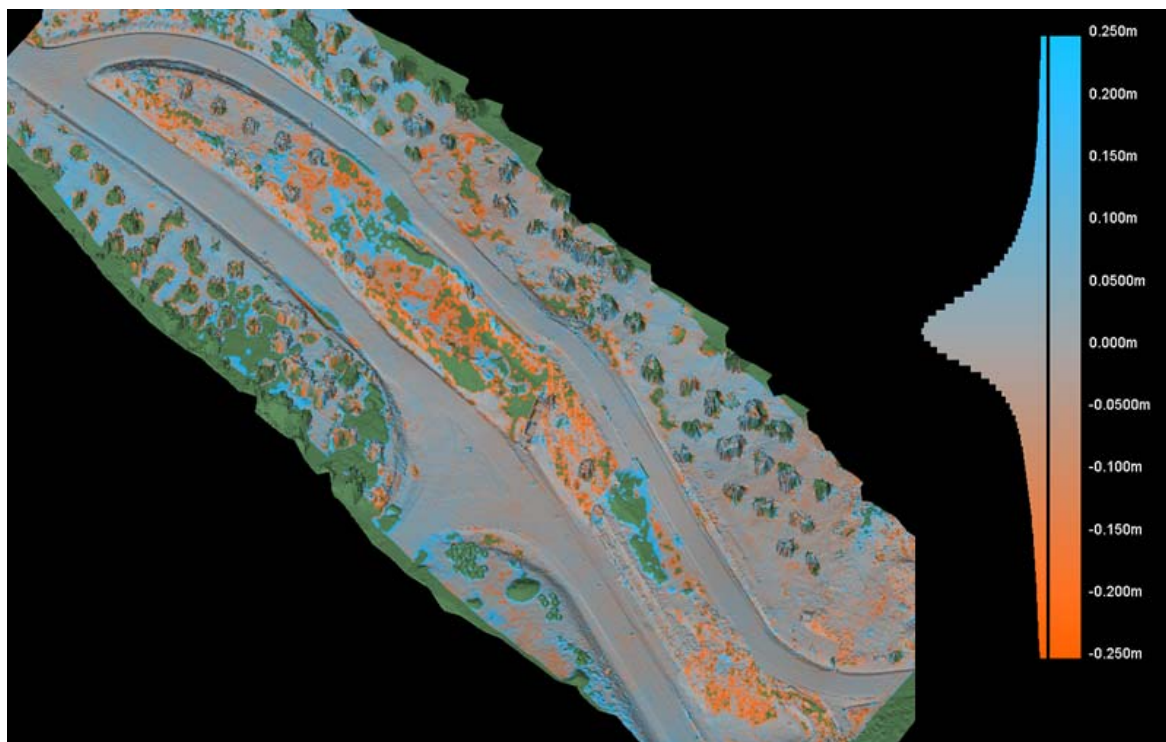


Figura 4.7. Mapa de color, resultante de la comparativa entre las campañas 20141223 y 20150327, junto con el histograma y escala de color utilizada.

El error medio cuadrático del modelo está entorno a 0 cm, por lo que se puede considerar que no hay problemas de orientación en los datos respecto al sistema de referencia marcado. Las diferencias observadas, están entorno a pocos cm (0-5), que pueden estar justificadas por la variación de la superficie entre campañas y por los errores propios atribuibles al sistema, así como a las diferencias de vegetación.

Puesto que las fechas entre las campañas anteriores son muy cercanas, se han empleado los datos de un vuelo realizado en una fecha más alejada en el tiempo de manera que se puedan observar mayores cambios en el firme de la carretera. Los datos de dicho vuelo han sido suministrados por el Grupo de Investigación “Sistemas Fotogramétricos y Topométricos de la Universidad de Jaén.

Siguiendo él mismo procedimiento anterior, se ha obtenido el mapa de color resultante de la comparación entre la campaña 20150327 y la campaña 20140117.

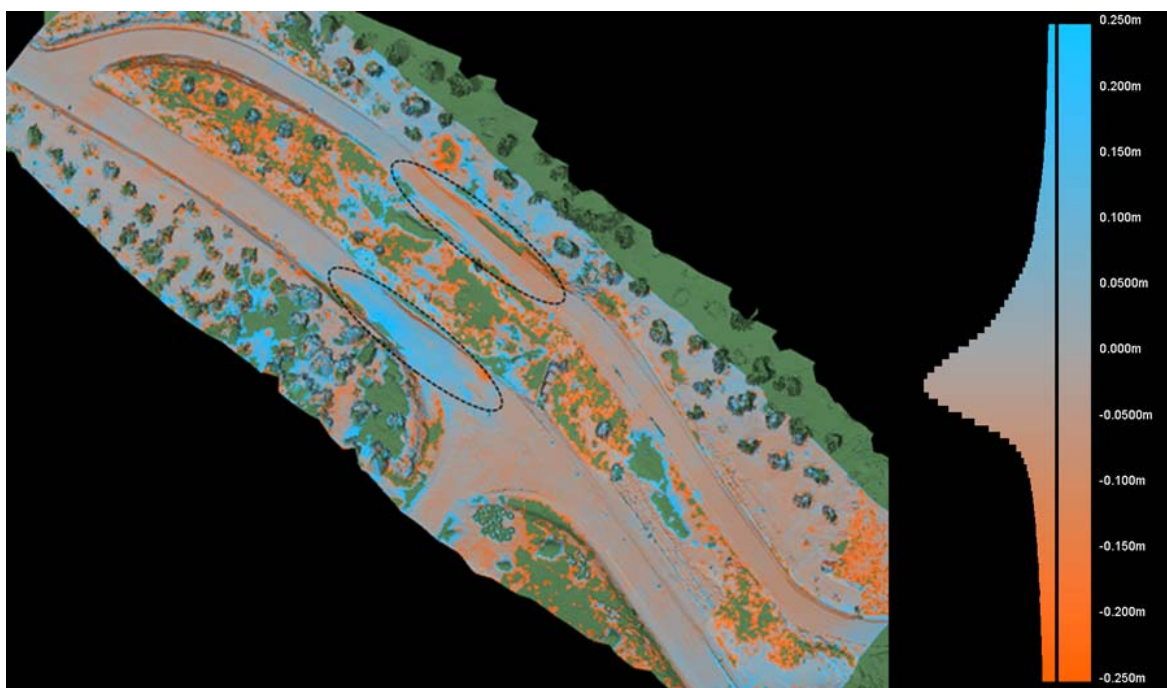


Figura 4.8. Mapa de color, resultante de la comparativa entre las campañas 20140117 y 20150327, junto con el histograma y escala de color utilizada.

A nivel visual se puede comprobar que realmente el firme de la carretera ha sufrido un desplazamiento en el periodo transcurrido. Hay zona de la superficie tomada posteriormente que se encuentran por debajo de la superficie base (valores negativos color naranja), y zonas que están por encima de la superficie base (valores positivos color azul). En relación al firme, se aprecian claramente estas zonas de deformación en ambos tramos paralelos de carretera (Figura 4.8).

Además se ve un sistematismo en las diferencias a lo largo de toda la carretera, provocado seguramente por la adición de firme en la zona afectada por parte de los encargados de la conservación de carreteras.

#### 4.4.2. Estudio sobre ortoimágenes

El estudio llevado a cabo sobre superficies, puede dar una idea de la presencia y de la magnitud de las deformaciones, pero cuando el desplazamiento es mayoritariamente planimétrico este puede quedar oculto en este tipo de análisis volumétricos. El estudio realizado mediante ortofotografías (Figura 4.9), sobre las que se han realizado medidas de desplazamiento entre las líneas de la carretera, ha permitido localizar los movimientos sufridos en la carretera como se observa en la Figura 4.10.



Figura 4.9. Capturas correspondientes a las ortofotografías de las campañas 2014117, 20141223 y 20150327 (de izquierda a derecha).

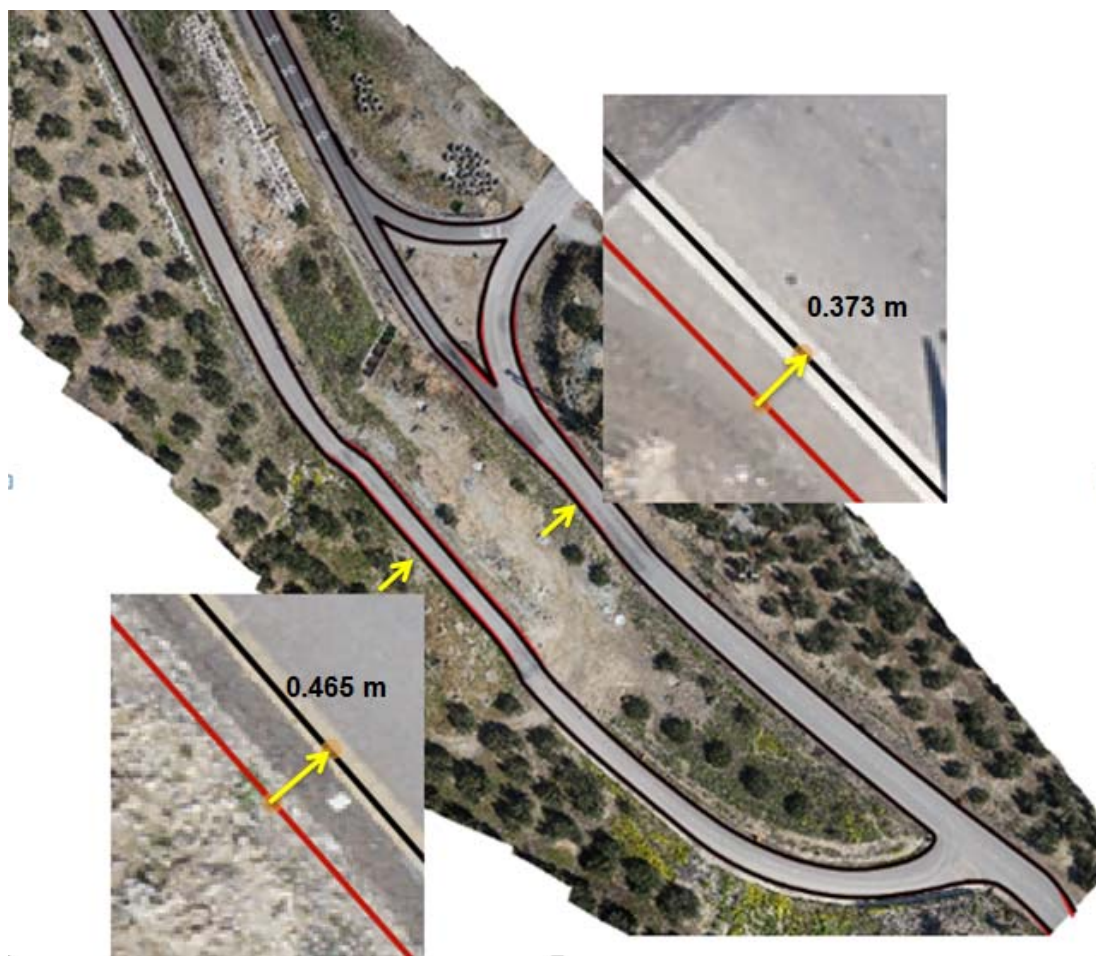


Figura 4.10. Medidas de desplazamiento. En rojo campaña de referencia (20140117) y en negro campaña más reciente (20150327). Las flechas en indican la dirección del desplazamiento.

Analizando los resultados obtenidos en ambas comparaciones (de superficies y de ortoimágenes), se pueden sacar algunas conclusiones. A partir de la anterior comparación entre las superficies (Figura 4.8), se aprecian variaciones en la vertical en el firme de la carretera no superando los 0.20 m. No obstante en las zonas donde el firme ha sufrido un hundimiento la deformación vertical se enmascara al añadir material de relleno en el reasfalto del firme. Por tanto, y como ilustra la Figura 4.10, la principal deformación, y la que presta una mayor facilidad de cuantificación, se concentra en el desplazamiento horizontal, encontrándose un desplazamiento máximo aproximado entorno a 0.50 m en un espacio temporal de un año y medio.

#### 4.4.3. Estudio con datos del IR térmico

De forma adicional, se incluye el modelo obtenido a partir de datos capturados con la cámara optris PI 400 que opera en la banda del IR térmico (Plano nº7), siendo esta instalada en UAV ATYGES Topodron. Estos datos corresponden a la campaña 20150327. Hay que indicar que estos resultados son preliminares y se muestran sólo para exponer las posibilidades del empleo de los UAV equipados con diferentes tipos de sensores en el estudio de deformaciones del terreno.

Las zonas del firme que han sufrido deformación aparecen más rojas en el térmico (Figura 4.11), esto es, a una temperatura más elevada. En estas zonas, el firme, al ser reasfaltado con más frecuencia, es más oscuro, absorbiendo, por tanto, más radiación, lo que se traduce en mayor temperatura. Por tanto, el modelo de temperaturas permite identificar de forma indirecta aquellas zonas del firme de la carretera que están sufriendo deformación y donde, como consecuencia, es necesaria la reposición del pavimento.

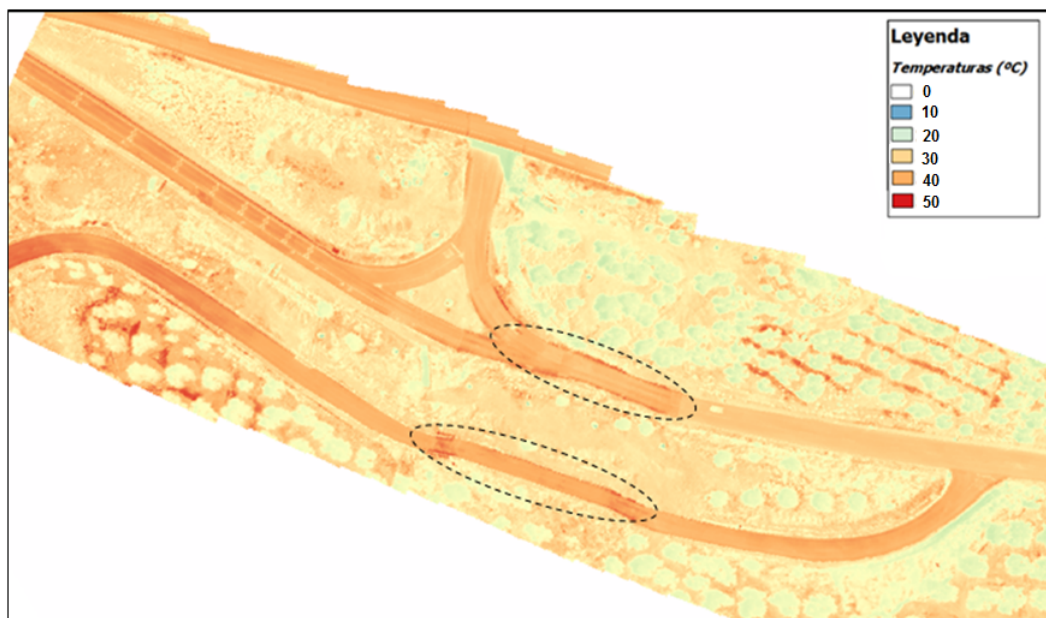


Figura 4.11. Diferencia de temperaturas. Campaña 20150327

## **4.5. Análisis de viabilidad**

Las dos técnicas empleadas tienen un gran potencial para este tipo de estudios de análisis multitemporales. El empleo de sistemas UAV y fotogrametría han permitido detectar cambios en el estado del objeto de estudio que además han sido cuantificados y representados. Entre las campañas 20140117 y 20150327 se han detectado desplazamientos máximos entorno a 0.20 m en la componente vertical mientras que en la componente horizontal los desplazamientos máximos encontrados son de, aproximadamente, 0.50m.

Considerando las ventajas en la captura de los datos, las precisiones ofrecidas, precio del instrumental, rendimiento en el flujo de trabajo en gabinete, coste del software, se optaría por trabajar con UAV para este tipo de estudios, especialmente cuando se requiere hacer la adquisición de datos desde zonas sobre elevadas sobre el objeto. No obstante los resultados obtenidos mediante TLS han demostrado precisiones coherentes con los objetivos del trabajo, por ello el empleo conjunto de ambas técnicas resultaría ideal en otro tipo de situaciones donde las características de la zona de estudio no exigiera de una captura cenital de los datos.

## **4.6. Conclusiones**

### **4.6.1. Conclusiones respecto a las técnicas y metodologías empleadas.**

El presente trabajo muestra la similitud metodológica de ambas técnicas para este tipo de aplicaciones. Aunque ambas técnicas presentan particularidades, las fases de trabajo son muy similares.

Ambas técnicas permiten una captura de datos de alta densidad y exactitud posicional en cortos periodos de tiempo. Sin embargo, en esta fase de captura de datos aparecen las primeras diferencias que pueden condicionar la elección de una u otra técnica.

En cuanto a los equipos UAV, estos se caracterizan por ser ligeros, muy ágiles y sencillos de manejar permitiendo el acceso a zonas difíciles. Las imágenes aportarán además una importante información semántica lo que supone un valor añadido, ya que permite mediante fotointerpretación la detección visual de grietas, deterioro o incidencias en el objeto que no pueden ser capturadas por otros métodos de adquisición.

Por otro parte, el TLS es un método de observación directo, obteniéndose modelos muy densos, de gran detalle y precisión. La captura de datos mediante TLS presenta el inconveniente de requerir estacionamiento en tierra para la toma de datos, no garantizándose en ocasiones el retorno del sistema láser, pudiendo resultar un trabajo tedioso en zonas de difícil acceso, inestables o peligrosas. Así mismo, la captura de datos mediante esta técnica puede presentar zonas de oclusión que con los sistemas UAV son capturadas.

Independientemente del método de adquisición de datos empleado, será necesaria una correcta planificación de la captura, así como una correcta ejecución de la misma. De esta manera se asegurará el cumplimiento de los objetivos planteados, así como ahorros en tiempos y dinero. De la correcta planificación y ejecución de la captura de datos dependerá el resultados de las siguientes fases y la calidad del resultado final.

Así mismo resulta imprescindible definir el marco de referencia de manera que exista coherencia espacial entre los datos. La definición de un marco de referencia común garantiza que los cambios encontrados no sean consecuencia de falta de coherencia de los datos, sino consecuencia del fenómeno de estudio.

En lo referente a la orientación, para la orientación de datos mediante técnica UAV, con la tecnología de posicionamiento en vuelo actual en este tipo de sistemas es imprescindible el empleo de puntos de control en la zona de estudio. Sin embargo, el TLS no requiere de puntos de control sobre la zona estudiada, ya que se pueden utilizar los centros de escaneo como puntos de control si se tiene la precaución de un correcto diseño de la red de trabajo, evitando de esta manera el acceso a la zona de estudio para la colocación de puntos de control. En principio, la orientación con técnicas TLS es más robusta, ya que se trata de una

observación directa. No obstante, los resultados de la orientación en ambas técnicas son idóneos, como queda explícito en el apartado 4.2.

La nube de puntos generada mediante TLS representa mejor la realidad debido a que los datos son medidos directamente. Como consecuencia, el nivel de detalle y resolución de las nubes de puntos adquiridas mediante TLS son mayores que las obtenidas mediante UAV. No obstante las nubes de puntos procedentes de TLS presenta mayor ruido. Por otro lado, las nubes de puntos generadas a partir de técnicas fotogramétricas se obtiene mediante procesos realizados sobre las imágenes capturadas, es decir se obtiene de manera indirecta, por tanto la densidad de la nube de puntos dependerá de factores como la calidad de las imágenes, su resolución, la radiometría o la perspectiva y la calidad en la orientación de las mismas. Todo esto deriva en nubes de puntos más suaves, resultando en menos ruido, pero también son menos fieles a la realidad.

En cuanto a las superficies obtenidas, aquella generada a partir de técnicas TLS es más rugosa y presenta más ruido que la obtenida a partir de fotogrametría, como se puede observar en la Figura 4.12.

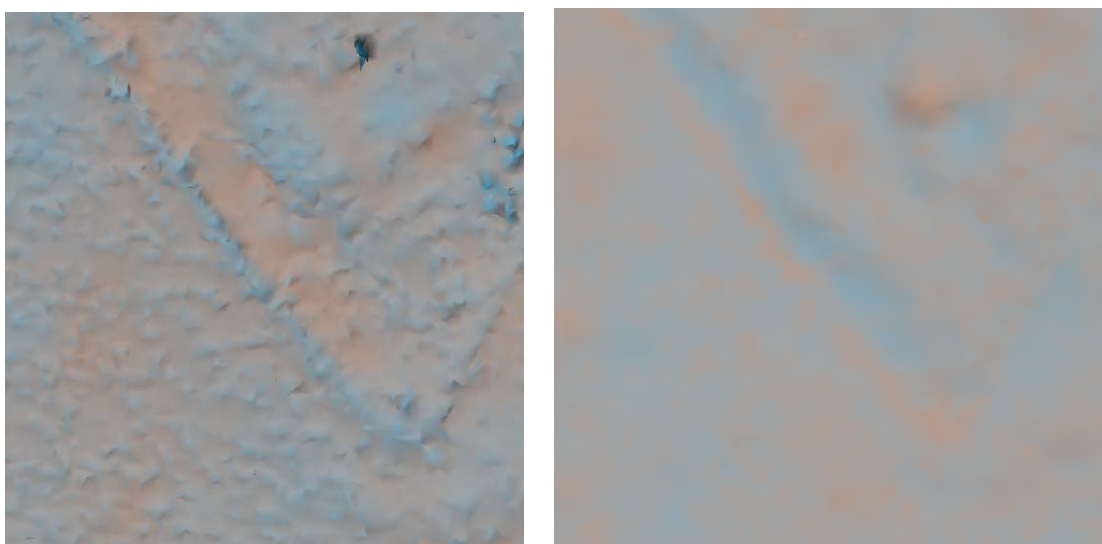


Figura 4.12. Rugosidad de los MDS obtenidos por TLS (izquierda) y UAV (derecha)

Además, en los modelos generados mediante TLS se pueden observar zonas de oclusión debido a que, en esta aplicación práctica, el eje de observación

no es perpendicular a la carretera, a diferencia de los datos capturados mediante UAV donde el eje de observación sí es perpendicular al plano del objeto de estudio, en este caso la carretera.

Tal y como se observa en la Figura 4.13 la diferencia existente entre ambas metodologías están en consonancia con las precisiones de orientación de los bloques. El dato de referencia es el modelo UAV mientras que el calculado es el modelo TLS. El histograma no es simétrico ya que se observa un desplazamiento positivo de los datos TLS de lo que se deduce que el modelo TLS se encuentra ligeramente por encima de los datos UAV. Este desplazamiento positivo puede ser debido a que la técnica TLS tiene más penetrabilidad sobre el objeto, siendo los modelos obtenidos por fotogrametría mucho más suaves, lo que hace que queden por debajo en zonas elevadas (vegetación u otros objetos) y por encima en zonas hundidas.

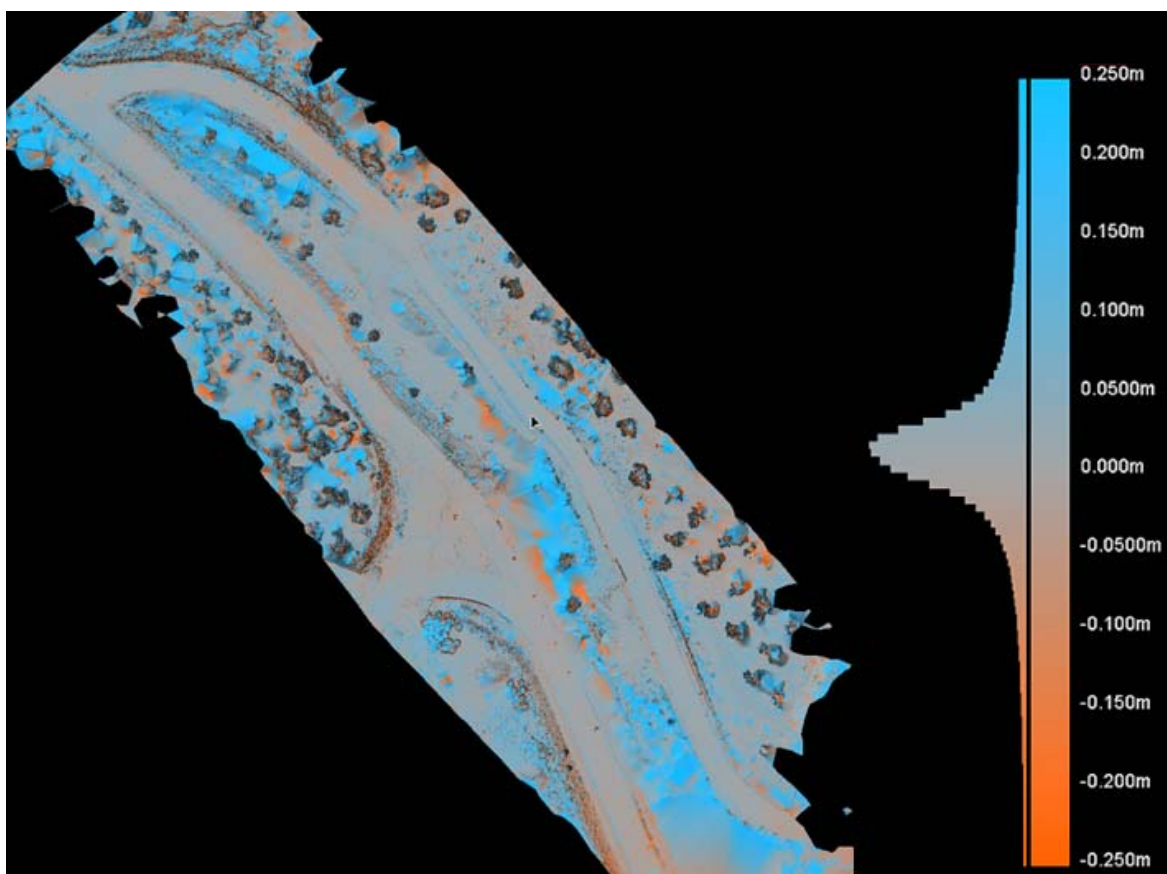


Figura 4.13. Comparación técnica UAV y TLS

#### **4.6.2. Conclusiones respecto a los resultados finales obtenidos**

A lo largo del trabajo se ha demostrado el potencial de los dispositivos UAV y técnicas fotogramétricas en este tipo de estudios, permitiendo cuantificar el movimiento y el comportamiento del tramo de carretera objeto de estudio, así como su estado. Para ello se han empleado las superficies y las ortoimágenes, obtenidas a partir de la aplicación práctica, que permiten una cuantificación del movimiento.

Cabe de decir que gracias a los elementos artificiales existentes (marcas de pintura, quitamiedos, señales, balizas, etc) es posible determinar de manera cuantitativa y apreciar visualmente, de forma clara, los deslizamientos existentes en esta zona. De no existir dichos elementos artificiales, sería menos evidente y más complejo el estudio de los movimientos existentes en la zona.

La metodología seguida para ambas técnicas ha sido similar. La elección de una u otra técnica dependerá de las características de la zona de estudio, de los productos a obtener y de sus precisiones. No obstante, el empleo conjunto de ambas tecnologías es, en muchas ocasiones, la mejor elección, ya que permite un estudio detallado, sin suponer grandes costes temporales y/o monetarios, y al mismo tiempo se aunan las ventajas de ambas técnicas al utilizarlas conjuntamente, pero se minimizan sus inconvenientes al emplearlas por separado.

## Bibliografía

---



## Bibliografía

- [1] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle and I. Harley, *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*, Scotland: Whittles publishing, 2006, p. 4.
- [2] J. L. Pérez García, *Análisis de deformaciones mediante técnicas fotogramétricas*, Jaén: Temario Control de Deformaciones en la Ingeniería. Ingeniería Geomática y Topográfica. EPSJ-UJA., 2013.
- [3] Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia.,» 5 Julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2014/10/17/pdfs/BOE-A-2014-10517.pdf>. [Último acceso: 23 Marzo 2015].
- [4] Asociación Profesional del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos. , «Instituto Geográfico Nacional (IGN). Temarios y documentación de cursos. Temas generales. Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.ign.es/ign/resources/acercaDe/aig/A2.pdf>. [Último acceso: 18 Marzo 2015].
- [5] Normas Técnicas Cartográficas de Andalucía, «NTCA\_02005\_Procesos. Vuelo fotogramétrico,» 27 05 2013. [En línea]. Available: [http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/ieagen/sea/ntca/02\\_procesos/NTCA\\_02005\\_Vuelo\\_fotogrametrico\\_BORRADOR.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/ieagen/sea/ntca/02_procesos/NTCA_02005_Vuelo_fotogrametrico_BORRADOR.pdf). [Último acceso: 18 enero 2015].
- [6] Normas Técnicas Cartográficas de Andalucía, «NTCA\_02008\_Procesos. Apoyo a vuelos fotogramétricos,» 19 Abril 2013. [En línea]. Available: [http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/ieagen/sea/ntca/02\\_procesos/NTCA\\_02008\\_Apoyos\\_a\\_vuelos%20fotogrametricos\\_BORRADOR.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/ieagen/sea/ntca/02_procesos/NTCA_02008_Apoyos_a_vuelos%20fotogrametricos_BORRADOR.pdf). [Último acceso: 14 enero 2015].
- [7] K. Kraus, *Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans*, 2nd edition ed., Berlin: Walter de Gruyter, 2004, pp. 419-427.
- [8] F. J. Cardenal Escarcena, *Tema 2. Instrumentación y métodos en fotogrametría no cartográfica*, Jaén: Métodos y aplicaciones no cartográficas. Ingeniería Geomática y Topográfica. EPSJ-UJA., 2013, pp. 14-21.
- [9] Normas Técnicas Cartográficas de Andalucía, «NTCA\_02002\_Procesos. Observación y procesamiento GNSS,» 16 Mayo 2011. [En línea]. Available: [http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/ieagen/sea/ntca/02\\_procesos/02002\\_Observacion\\_procesamiento.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/ieagen/sea/ntca/02_procesos/02002_Observacion_procesamiento.pdf). [Último acceso: 16 enero 2014].
- [10] J. Mills and D. Barber, *An addendum to the metric survey specifications for English Heritage - The collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods*, London: English Heritage, 2006, pp. 4,23,34.

- [11] J. Arco Díaz, R. Saucedo Vargas y D. Hidalgo García, «Laser escaner3D aplicado a edificación,» de *Congreso Internacional Expresión Gráfica aplicada a la Edificación.*, X ed., Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (APEGA), 2010, p. 230.
- [12] J. L. Lerma García y J. M. Biosca Taron, *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas .*, vol. 5, 3DRiskMapping, 2008.
- [13] T. Fernández, J. L. Pérez, A. López, J. M. Gómez, J. Cardenal y J. Delgado, «Monitorización de laderas inestables mediante técnicas fotogramétricas a partir de vuelos UAV e históricos,» 2014 Junio. [En línea]. Available: [http://age-tig.es/2014\\_Alicante/ponencia1/80.pdf](http://age-tig.es/2014_Alicante/ponencia1/80.pdf). [Último acceso: 18 Marzo 2015].
- [14] K. Budmiger, J. Delgado García, J. L. Pérez García y F. J. Cardenal Escarcena, «Planificación y control de calidad de vuelos fotogramétricos. El sistema Topoflight,» 2006. [En línea]. Available: [http://age-tig.es/docs/XII\\_2/046%20-%20Budminger%20et%20al.pdf](http://age-tig.es/docs/XII_2/046%20-%20Budminger%20et%20al.pdf). [Último acceso: 20 Noviembre 2014].
- [15] F. Chiabrando, A. Lingua, F. Noardo y A. Spano, «3D Modelling of Trompe l'oeil decorated vaults using dense matching techniques,» *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, vol. I, nº V Symposium, p. 100, 25 Junio 2014.

# Anejos

---



## Anejos

### Anejo 1. Apoyo Fotogramétrico

- Campaña 20140117

ID	X <sub>UTM-30</sub> [m]	Y <sub>UTM-30</sub> [m]	h [m]
d100	438272.23	4178770.8	586.7913
d104	438393.951	4178635.99	588.0251
d105	438435.147	4178629.52	587.7495
d106	438415.37	4178666.2	584.6085
d107	438383.433	4178691.22	581.9904
d108	438341.215	4178739.81	578.6558
d109	438314.524	4178786.1	578.2565
d121	438300.724	4178727.49	587.2047
d131	438352.854	4178691.91	585.1832
d141	438393.949	4178635.99	588.0296

Tabla 0.1. Coordenadas PC. Campaña 20140117

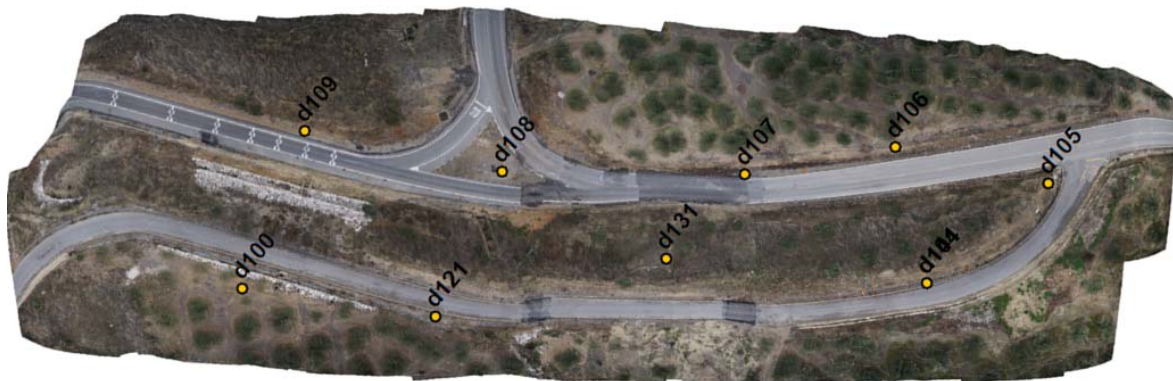


Figura 0.1. Distribución PC. Campaña 20140117

- **Campaña 20141223**

ID	$X_{UTM-30}$ [m]	$Y_{UTM-30}$ [m]	h [m]
D1	438272.8418	4178785.3034	585.7029
D2	438301.8328	4178760.4014	583.2599
D3	438334.8098	4178700.7554	587.7199
D4	438365.8058	4178663.0884	588.4849
D5	438439.1048	4178628.9144	586.6379
D6	438454.9548	4178630.8444	587.3579
D7	438407.8448	4178673.8704	584.4379
D8	438356.6998	4178728.0464	579.4339
D9	438314.9898	4178784.9184	578.2219
D10	438295.3038	4178819.2594	579.8189
D11	438304.6308	4178790.1854	578.9179
D12	438327.1618	4178756.0534	578.2969
D13	438327.1918	4178756.0254	578.3009
D14	438352.6968	4178715.5684	580.9229
D15	438399.6238	4178669.7244	583.7459
D16	438445.3198	4178620.8754	587.3199
D17	438401.0878	4178624.0704	588.0099
D18	438372.8848	4178645.5744	588.6309
D19	438337.9698	4178685.7284	588.4019
D20	438303.0618	4178725.9614	587.5469
D21	438283.0248	4178766.5754	584.4559
D22	438261.1638	4178805.3594	587.4359

Tabla 0.2. Coordenadas PC. Campaña 20141223



Figura 0.2. Distribución PC. Campaña 20141223

- **Campaña 20150327**

ID	$X_{UTM-30}$ [m]	$Y_{UTM-30}$ [m]	h [m]
D1	438262.3329	4178799.342	587.0135
D2	438269.176	4178806.575	587.3576
D3	438305.7163	4178752.86	584.8091
D4	438305.7562	4178753.488	584.8076
D5	438291.6641	4178738.384	586.4447
D6	438331.8865	4178700.266	588.2557
D7	438347.2722	4178672.861	588.3169
D8	438359.352	4178670.187	588.094
D9	438439.0479	4178628.836	586.667
D10	438439.053	4178628.833	586.6659
D11	438446.3497	4178626.13	587.2423
D12	438411.8861	4178664.673	584.3185
D13	438407.0693	4178658.895	584.562
D14	438379.7185	4178697.676	581.939
D15	438351.4293	4178716.952	580.8961
D16	438350.2994	4178753.645	577.813
D17	438327.5282	4178757.506	578.2425
D18	438312.293	4178775.549	578.6053
D19	438297.9709	4178804.31	579.3182
D20	438285.5899	4178829.46	580.1276
D21	438285.5926	4178829.457	580.1298
D22	438357.052	4178727.727	579.472

Tabla 0.3. Coordenadas PC. Campaña 20150327



Figura 0.3. Distribución PC. Campaña 20150327

## Anejo 2. Captura de datos. Vuelos fotogramétricos

- **Campaña 20140117**

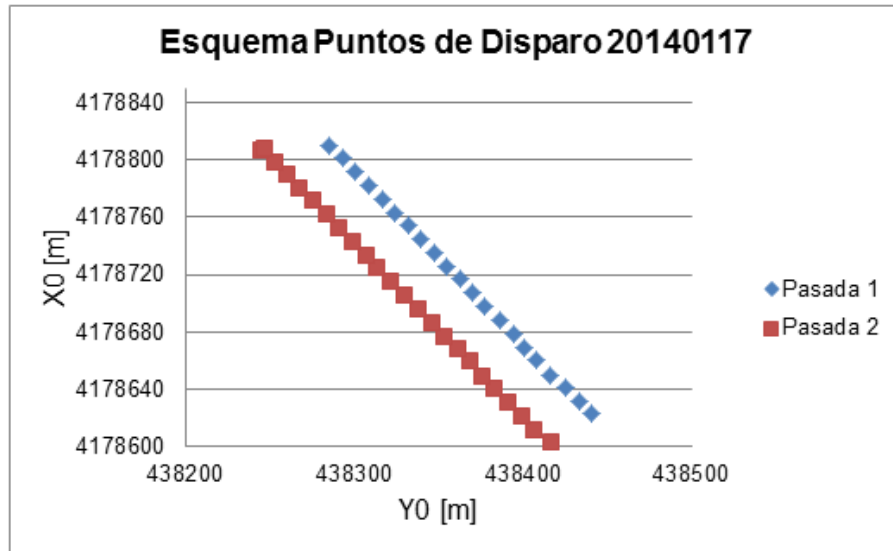


Figura 0.4. Gráfico puntos de disparo. Campaña UAV\_2014017.

- **Campaña 20141223**

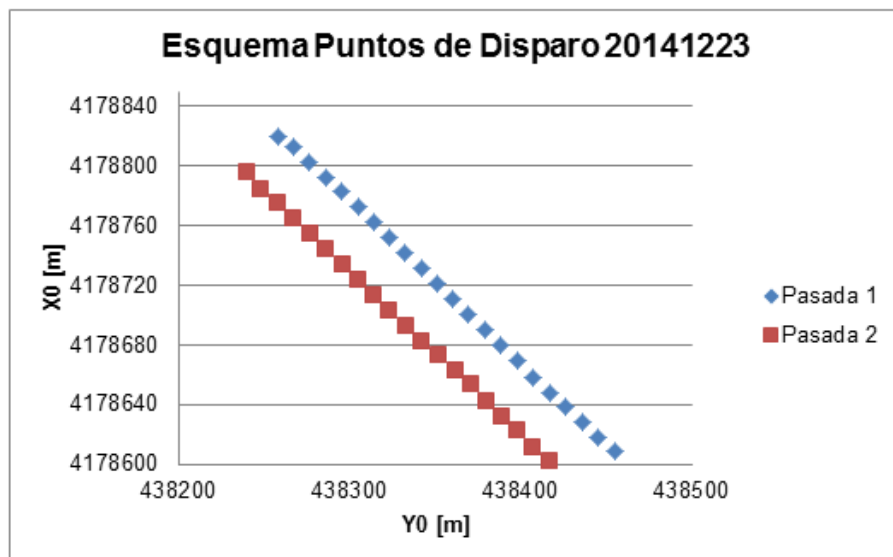


Figura 0.5. Gráfico puntos de disparo. Campaña UAV\_20141223.

- **Campaña 20150327**

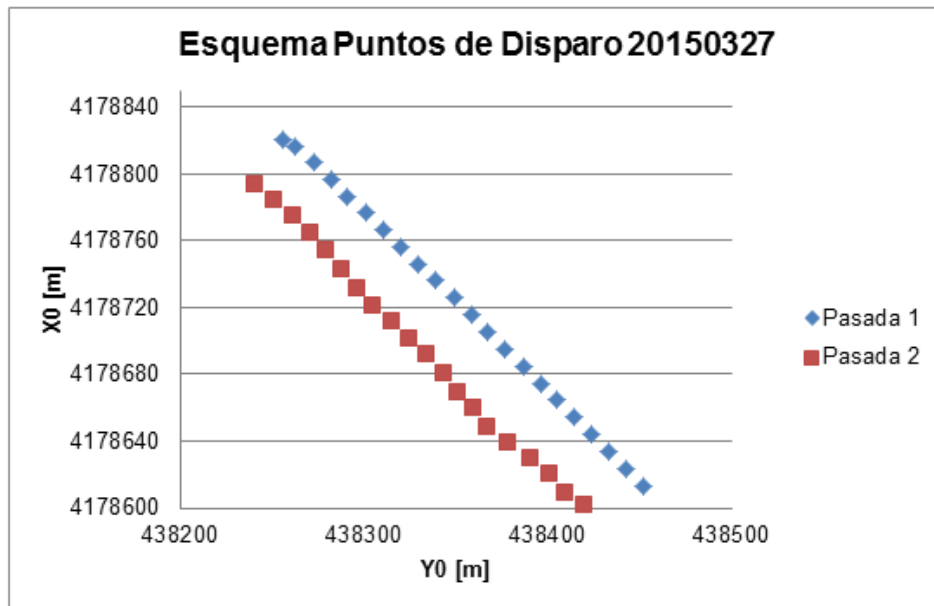


Figura 0.6. Gráfico puntos de disparo. Campaña UAV\_20141223.

**Anejo 3. Resultados de orientación fotogramétrica. Precisiones**

- **Campaña 20140117**

ID	X <sub>error</sub> [m]	Y <sub>error</sub> [m]	Z <sub>error</sub> [m]	Error [m]	Proyecciones	Error [pix]
<b>d100</b>	0.00696	-0.050222	-0.007035	0.051188	3	0.104277
<b>d104</b>	-0.025333	0.001787	0.002683	0.025538	3	0.03211
<b>d105</b>	-0.009658	-0.033415	-0.000143	0.034783	3	0.116984
<b>d106</b>	0.018322	-0.006056	-0.00576	0.020138	3	0.140273
<b>d107</b>	0.018488	0.019523	0.001794	0.026948	6	0.242639
<b>d108</b>	0.00157	0.02722	-0.001208	0.027292	8	0.43958
<b>d109</b>	-0.022215	0.005106	-0.002914	0.022979	4	0.178701
<b>d121</b>	0.010137	0.012653	0.010188	0.019148	3	0.57153
<b>d131</b>	0.002522	0.023697	0.001987	0.023914	7	0.339466
<b>Total</b>	<b>0.014374</b>	<b>0.023555</b>	<b>0.004591</b>	<b>0.027974</b>	<b>40</b>	<b>0.314214</b>

Tabla 0.4. Precisiones de la orientación fotogramétrica con Agisoft PhotoScan. Campaña 20140117

- **Campaña 20141223**

ID	X <sub>error</sub> [m]	Y <sub>error</sub> [m]	Z <sub>error</sub> [m]	Error [m]	Proyecciones	Error [pix]
<b>D1</b>	-0.010524	0.034131	0.01051	0.037231	6	0.246813
<b>D2</b>	-0.005522	-0.01922	0.020018	0.028295	6	0.359127
<b>D3</b>	0.007152	-0.02319	-0.010165	0.02631	5	0.137005
<b>D4</b>	-0.009867	0.014465	-0.003905	0.01794	6	0.22221
<b>D5</b>	-0.000275	-0.008066	-0.005657	0.009856	3	0.136863
<b>D6</b>	0.013139	0.00391	0.006055	0.014986	3	0.183267
<b>D7</b>	0.025506	-0.010134	-0.00652	0.028209	2	0.122183
<b>D8</b>	0.017219	0.002819	0.024805	0.030327	4	0.202648
<b>D9</b>	-0.005729	0.004367	-0.010329	0.012593	3	0.397637
<b>D10</b>	-0.001852	-0.015379	-0.002509	0.015692	3	0.186579
<b>D11</b>	0.005473	0.011764	-0.005073	0.013931	5	0.155446
<b>D13</b>	-0.011343	-0.012235	-0.015264	0.022613	6	0.218798
<b>D14</b>	0.005581	-0.005185	-0.006017	0.009707	6	0.333173
<b>D16</b>	0.011778	-0.000841	0.00201	0.011978	3	0.289049
<b>D17</b>	-0.022068	0.023004	-0.002217	0.031954	4	0.241433
<b>D18</b>	-0.025137	0.000588	0.003888	0.025442	2	0.020221

<b>D19</b>	-0.00532	0.011221	-0.004269	0.013132	3	0.148715
<b>D20</b>	0.008402	0.003123	-0.010787	0.014025	3	0.085859
<b>D21</b>	-0.01504	0.002929	0.004786	0.016053	6	0.282189
<b>D22</b>	0.017533	-0.016725	-0.000059	0.024231	7	0.168489
<b>Total</b>	<b>0.012659</b>	<b>0.013479</b>	<b>0.009404</b>	<b>0.020746</b>	<b>86</b>	<b>0.23583</b>

Tabla 0.5. Precisiones de la orientación fotogramétrica con Agisoft PhotoScan. Campaña 20141223

- **Campaña 20150327**

ID	X <sub>error</sub> [m]	Y <sub>error</sub> [m]	Z <sub>error</sub> [m]	Error [m]	Proyecciones	Error [pix]
<b>D1</b>	0.011994	-0.005462	0.006143	0.014541	5	0.152614
<b>D2</b>	0.018814	0.000588	0.006288	0.019845	5	0.194756
<b>D3</b>	-0.003787	0.017554	-0.007542	0.019478	7	0.235658
<b>D4</b>	-0.012457	-0.007279	-0.006621	0.015874	7	0.229554
<b>D5</b>	-0.013995	0.007135	0.000896	0.015734	3	0.216499
<b>D6</b>	0.016458	0.017188	-0.024469	0.034133	6	0.223079
<b>D7</b>	-0.00086	0.025623	0.007321	0.026662	3	0.297854
<b>D8</b>	-0.001317	0.029714	-0.006289	0.030401	5	0.200225
<b>D10</b>	0.019279	0.000064	0.006909	0.02048	3	0.187115
<b>D11</b>	0.010706	-0.008683	0.021232	0.025314	2	0.197385
<b>D12</b>	0.010482	-0.00802	-0.00049	0.013208	3	0.154345
<b>D13</b>	0.001649	-0.020892	-0.006831	0.022042	6	0.225383
<b>D14</b>	-0.00451	-0.002775	0.002565	0.005885	3	0.20723
<b>D15</b>	-0.024705	-0.008488	0.013832	0.029558	7	0.197322
<b>D16</b>	-0.006096	-0.009691	-0.004834	0.012427	4	0.148474
<b>D17</b>	-0.01025	0.005966	-0.001436	0.011946	4	0.196133
<b>D18</b>	-0.012079	-0.0153	0.010892	0.02233	4	0.133376
<b>D19</b>	0.005936	-0.001053	-0.00119	0.006145	3	0.219225
<b>D21</b>	0.00126	-0.004498	0.004453	0.006454	4	0.224362
<b>D22</b>	-0.006312	-0.01639	-0.002501	0.01774	3	0.10229
<b>Total</b>	<b>0.011685</b>	<b>0.013391</b>	<b>0.009449</b>	<b>0.020129</b>	<b>87</b>	<b>0.20399</b>

Tabla 0.6. Precisiones de la orientación fotogramétrica con Agisoft PhotoScan. Campaña 20150327

## Anejo 4. Resultados de orientación fotogramétrica. Parámetros de Orientación Externa

- **Campaña 20140117**

Imagen	Xo [m]	Yo [m]	Zo [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
01_00081	438284.625	4178809.504	626.944	4.523	-0.413	-138.937
01_00082	438293.580	4178801.625	627.091	5.372	0.774	-141.491
01_00083	438300.631	4178791.634	627.279	4.465	0.171	-142.654
01_00084	438308.846	4178782.099	627.161	4.707	1.214	-140.414
01_00085	438316.343	4178772.351	627.039	5.654	0.185	-142.040
01_00086	438323.799	4178762.999	626.987	5.401	0.333	-141.674
01_00087	438332.254	4178754.455	626.903	4.537	0.905	-138.136
01_00088	438339.803	4178744.530	626.845	4.878	0.866	-138.151
01_00089	438347.265	4178735.499	626.880	5.690	0.736	-140.815
01_00090	438354.989	4178725.317	626.862	5.084	1.390	-138.413
01_00091	438362.770	4178717.298	626.777	5.831	1.004	-138.954
01_00092	438369.833	4178707.610	626.618	6.172	1.120	-138.256
01_00093	438377.460	4178698.150	626.391	5.855	1.218	-139.708
01_00094	438386.853	4178687.791	626.525	6.785	0.475	-141.644
01_00095	438394.403	4178678.766	626.434	5.051	1.586	-137.020
01_00096	438400.946	4178669.297	626.302	5.793	0.694	-143.341
01_00097	438408.363	4178660.759	626.070	7.074	0.181	-144.222
01_00098	438416.659	4178650.049	626.048	5.342	0.736	-146.086
01_00099	438425.805	4178641.373	626.049	6.041	0.301	-138.500
01_00100	438433.498	4178631.996	625.974	6.811	0.904	-140.257
01_00101	438440.496	4178623.050	625.750	6.686	0.951	-139.793
01_00102	438448.869	4178613.801	625.516	4.740	0.559	-138.670
02_00103	438416.828	4178602.970	625.172	3.894	1.403	-137.928
02_00104	438407.413	4178611.004	624.866	4.759	1.952	-141.909
02_00105	438399.762	4178621.288	624.868	4.230	0.575	-141.355
02_00106	438392.005	4178630.473	624.802	4.259	0.272	-141.485
02_00107	438383.011	4178640.784	624.828	3.320	-0.723	-143.447
02_00108	438376.434	4178648.946	624.935	4.848	0.476	-145.577
02_00109	438368.874	4178659.749	624.524	5.131	1.289	-142.993
02_00110	438361.879	4178668.408	624.473	4.706	0.841	-137.511
02_00111	438353.310	4178676.689	624.570	5.501	-1.816	-136.834
02_00112	438346.830	4178685.919	624.524	5.041	-0.011	-142.397
02_00113	438338.421	4178695.676	624.642	4.077	0.277	-143.320
02_00114	438329.986	4178705.591	624.629	4.423	-0.337	-143.498
02_00115	438322.009	4178715.260	624.565	4.878	0.066	-140.879
02_00116	438313.655	4178724.598	624.764	3.989	0.340	-134.472

02_00117	438307.500	4178732.563	624.672	4.153	1.003	-143.022
02_00118	438298.954	4178742.302	624.563	3.641	0.507	-144.218
02_00119	438291.394	4178752.012	624.594	4.408	0.383	-142.951
02_00120	438284.395	4178761.897	624.328	4.364	0.195	-142.890
02_00121	438275.629	4178771.243	624.195	4.892	0.992	-145.829
02_00122	438267.905	4178780.139	624.424	3.946	0.078	-141.313
02_00123	438260.229	4178789.467	624.284	3.966	-0.307	-140.619
02_00124	438252.808	4178798.383	624.090	4.039	0.341	-141.484
02_00125	438245.066	4178806.633	624.264	3.292	-0.209	-141.103

Tabla 0.7. Resultados orientación fotogramétrica con Agisoft PhotoScan. Campaña 20140117

- **Campaña 20141223**

Imagen	Xo [m]	Yo [m]	Zo [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
DSC01038	438258.164	4178820.050	626.431	6.804	5.213	-136.445
DSC01039	438267.296	4178812.965	626.677	6.787	6.431	-136.781
DSC01040	438276.720	4178803.043	627.088	6.294	5.210	-135.199
DSC01041	438286.297	4178792.783	627.550	5.282	4.730	-136.263
DSC01042	438295.569	4178782.974	627.433	4.335	4.530	-137.228
DSC01043	438304.759	4178773.154	627.479	3.744	3.341	-139.602
DSC01044	438314.024	4178762.635	627.517	3.237	3.146	-139.196
DSC01045	438323.590	4178752.445	627.483	3.087	3.397	-138.925
DSC01046	438332.461	4178741.781	627.501	3.230	3.339	-137.467
DSC01047	438341.933	4178731.287	627.427	2.840	3.349	-138.707
DSC01048	438351.281	4178720.954	627.326	2.360	3.179	-139.926
DSC01049	438360.629	4178710.744	627.352	2.752	3.543	-138.581
DSC01050	438369.477	4178700.091	627.370	2.110	3.073	-136.750
DSC01051	438378.835	4178690.005	627.216	1.682	2.928	-137.514
DSC01052	438388.523	4178679.665	627.089	2.103	3.054	-135.869
DSC01053	438397.954	4178669.363	626.961	2.228	2.532	-133.719
DSC01054	438407.109	4178658.528	626.923	3.524	2.568	-135.520
DSC01055	438416.836	4178648.427	626.807	2.890	1.898	-137.197
DSC01056	438426.476	4178638.494	626.777	2.615	2.805	-137.492
DSC01057	438435.881	4178628.279	626.719	2.318	3.044	-137.174
DSC01058	438445.653	4178618.330	626.652	2.361	2.276	-136.739
DSC01059	438455.122	4178608.448	626.491	2.013	3.144	-133.597
DSC01060	438436.014	4178586.427	625.910	2.982	7.159	-137.154
DSC01061	438426.802	4178592.752	624.991	2.988	4.601	-134.466
DSC01062	438417.450	4178602.305	624.999	5.419	5.037	-132.233
DSC01063	438406.768	4178611.668	625.212	6.381	7.633	-135.862
DSC01064	438398.324	4178622.150	625.170	9.493	7.029	-141.273
DSC01065	438389.598	4178632.371	625.294	8.061	8.990	-137.729

DSC01066	438380.647	4178642.707	625.170	10.136	9.021	-144.003
DSC01067	438371.150	4178653.178	625.326	11.550	9.841	-142.879
DSC01068	438361.747	4178663.240	625.441	11.182	9.867	-142.074
DSC01069	438352.165	4178673.350	625.557	12.018	10.240	-141.238
DSC01070	438342.495	4178682.802	625.582	12.946	10.434	-142.167
DSC01071	438332.993	4178692.825	625.729	13.983	10.424	-141.502
DSC01072	438323.408	4178703.073	626.205	14.234	10.830	-141.182
DSC01073	438314.080	4178713.113	626.030	14.911	12.011	-141.792
DSC01074	438305.380	4178723.507	626.020	15.071	11.314	-144.783
DSC01075	438295.839	4178733.822	625.843	16.494	11.329	-147.412
DSC01076	438286.535	4178743.913	626.006	15.569	10.937	-146.289
DSC01077	438277.411	4178754.647	625.670	15.821	11.174	-145.999
DSC01078	438267.611	4178764.770	625.500	15.629	11.290	-144.630
DSC01079	438258.229	4178774.690	625.458	15.853	11.558	-143.982
DSC01080	438248.749	4178784.541	625.518	16.851	12.014	-143.179
DSC01081	438240.483	4178795.962	626.305	15.462	12.099	-151.264

Tabla 0.8. Resultados orientación fotogramétrica con Agisoft PhotoScan. Campaña 20141223

- **Campaña 20150327**

Imagen	Xo [m]	Yo [m]	Zo [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
DSC01052	438256.191	4178821.005	627.695	10.206	7.854	-134.640
DSC01053	438262.559	4178815.973	627.846	10.027	10.923	-132.505
DSC01054	438272.554	4178806.674	627.899	9.590	8.879	-135.504
DSC01055	438282.013	4178796.508	627.993	8.665	7.837	-135.599
DSC01056	438291.049	4178786.540	628.100	6.982	7.796	-134.620
DSC01057	438300.858	4178776.510	628.387	7.253	6.268	-133.507
DSC01058	438310.249	4178766.320	628.608	6.805	5.217	-134.099
DSC01059	438319.785	4178756.157	628.659	6.794	5.774	-134.116
DSC01060	438329.447	4178746.247	628.651	6.844	5.142	-133.303
DSC01061	438339.175	4178736.555	628.584	6.899	4.919	-133.563
DSC01062	438349.484	4178726.225	628.646	6.367	5.995	-133.604
DSC01063	438358.224	4178715.915	628.905	6.177	5.268	-132.339
DSC01064	438367.424	4178705.678	628.757	6.720	5.267	-132.427
DSC01065	438376.994	4178695.014	628.604	7.146	5.734	-133.766
DSC01066	438386.693	4178684.681	628.331	5.577	5.960	-135.447
DSC01067	438395.975	4178674.526	628.400	5.816	5.861	-132.684
DSC01068	438405.184	4178664.534	628.538	5.969	5.283	-131.166
DSC01069	438414.340	4178654.392	628.671	5.988	5.155	-131.487
DSC01070	438423.774	4178643.726	628.724	6.566	4.989	-131.902
DSC01071	438433.133	4178633.592	628.672	6.591	5.823	-133.668
DSC01072	438442.460	4178623.479	628.690	5.987	4.631	-132.937

<b>DSC01073</b>	438452.441	4178613.218	628.755	6.805	5.261	-132.118
<b>DSC01074</b>	438434.357	4178586.772	627.906	6.459	5.356	-135.745
<b>DSC01075</b>	438430.069	4178589.610	627.220	2.525	5.256	-136.473
<b>DSC01076</b>	438420.231	4178601.361	626.424	7.714	5.036	-131.779
<b>DSC01077</b>	438409.956	4178609.381	626.769	9.879	8.616	-131.473
<b>DSC01078</b>	438400.896	4178619.817	626.868	10.688	9.885	-131.334
<b>DSC01079</b>	438390.681	4178629.267	627.028	11.410	9.144	-131.330
<b>DSC01080</b>	438378.450	4178638.630	626.705	11.580	8.900	-134.078
<b>DSC01081</b>	438367.142	4178648.560	627.135	7.518	11.325	-122.872
<b>DSC01082</b>	438359.106	4178659.211	627.123	9.337	12.143	-126.482
<b>DSC01083</b>	438351.087	4178669.568	626.873	10.093	12.091	-132.896
<b>DSC01084</b>	438343.675	4178680.432	626.622	11.398	10.433	-137.859
<b>DSC01085</b>	438334.309	4178691.450	626.463	12.133	10.794	-136.679
<b>DSC01086</b>	438324.959	4178701.012	626.442	12.462	12.024	-137.942
<b>DSC01087</b>	438315.393	4178711.349	626.483	12.617	11.213	-137.464
<b>DSC01088</b>	438304.900	4178720.989	626.602	11.846	12.561	-138.286
<b>DSC01089</b>	438296.547	4178731.554	626.648	12.894	11.095	-139.514
<b>DSC01090</b>	438287.553	4178742.364	626.550	12.535	11.393	-140.035
<b>DSC01091</b>	438279.184	4178753.644	626.237	13.593	11.387	-139.891
<b>DSC01092</b>	438270.755	4178764.610	626.145	13.967	11.570	-142.752
<b>DSC01093</b>	438261.222	4178775.084	626.051	15.525	9.859	-142.167
<b>DSC01094</b>	438250.962	4178783.875	626.096	13.501	11.604	-140.605
<b>DSC01095</b>	438240.641	4178793.573	626.335	13.848	12.055	-135.598

Tabla 0.9. Resultados orientación fotogramétrica con Agisoft PhotoScan. Campaña 2015032

# Productos

---

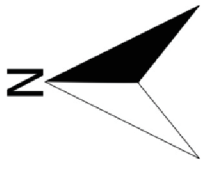
## Productos. Modelos Digitales y Ortofotografías

Los productos obtenidos para el presente TFG se muestran a continuación:

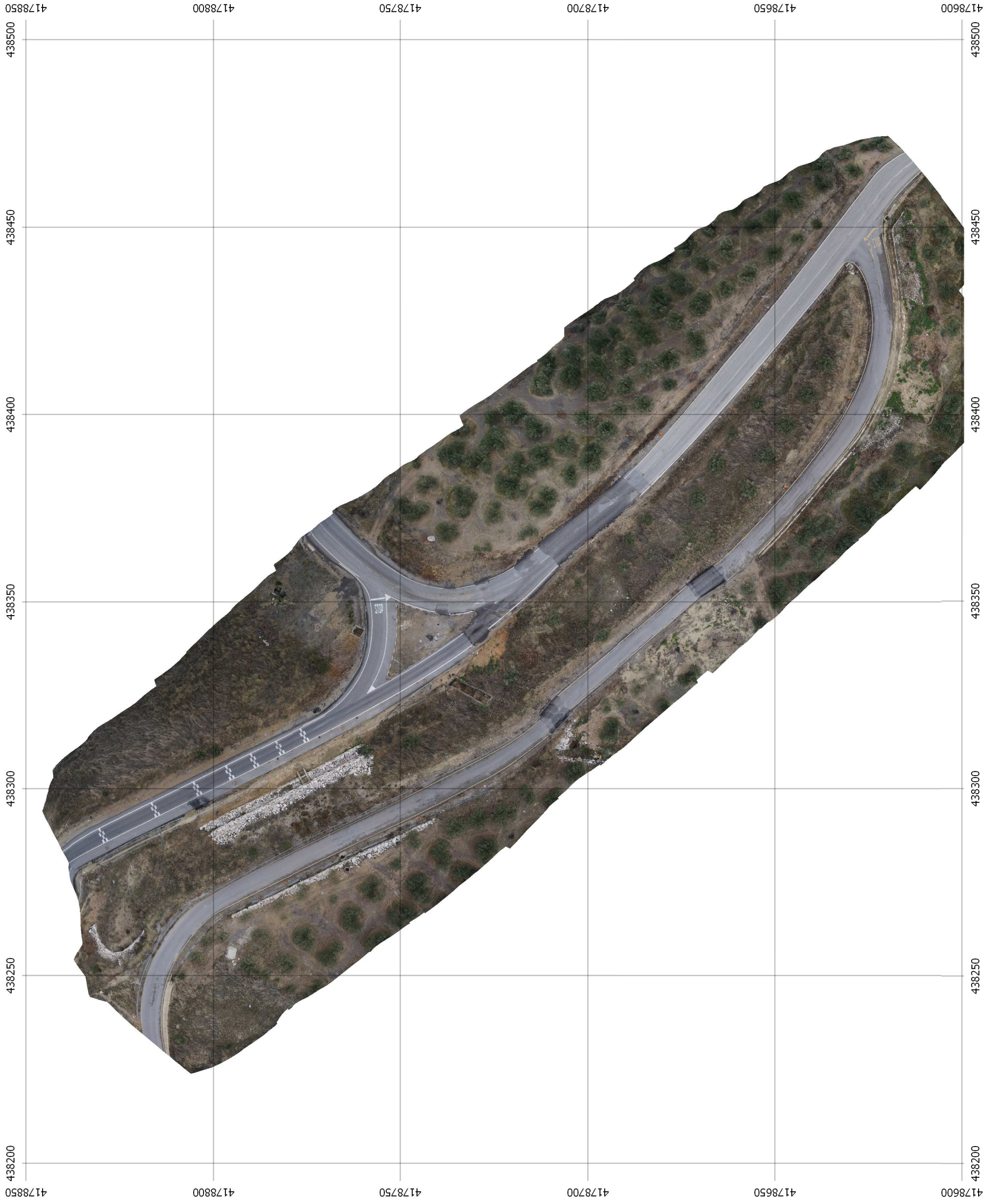
- Plano nº1. Ortofotografía (campaña 20140117).
- Plano nº2. Ortofotografía (campaña 20141223).
- Plano nº3. Ortofotografía (campaña 20150327).
- Plano nº4. Modelo digital de elevaciones (campaña 20140117).
- Plano nº5. Modelo digital de elevaciones (campaña 20141223).
- Plano nº6. Modelo digital de elevaciones (campaña 20150327).
- Plano nº7. Modelo digital de temperaturas.

La escala de representación de todos los planos es de de 1:1000.

# ORTOFOTOGRAFÍA (CAMPAÑA 20140117)



SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. ELIPSOIDE  
GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL.  
PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPULADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
ORTOFOTOGRAFÍA  
(CAMPAÑA 20140117)

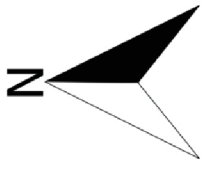
Nº PLANO:  
1

ESCALA  
1:1.000

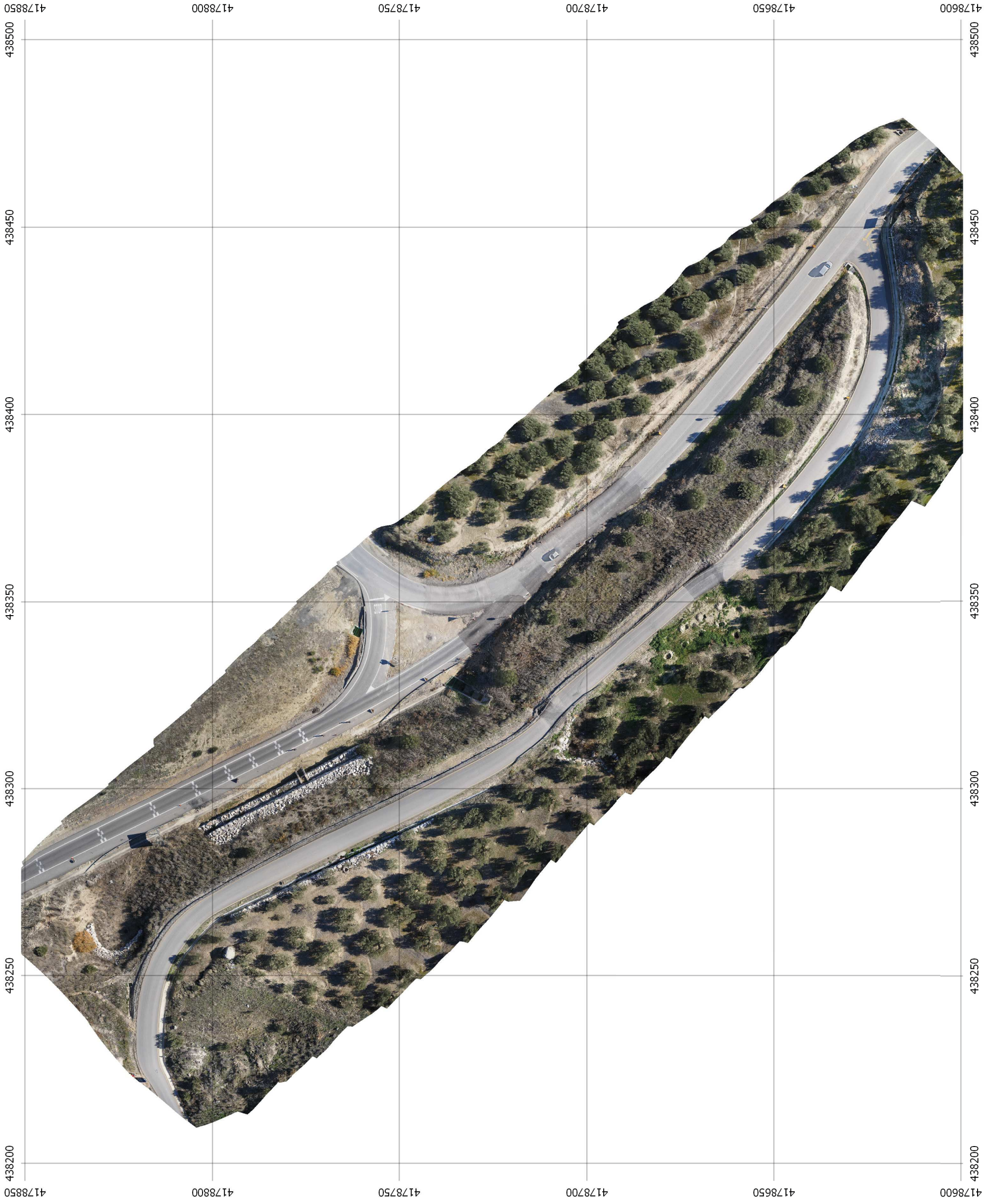
FORMATO UNE: A3  
10 0 10 20 30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015

# ORTOFOTOGRAFÍA (CAMPAÑA 20141223)



SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. ELIPSOIDE  
GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL.  
PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPULADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
ORTOFOTOGRAFÍA  
(CAMPAÑA 20141223)

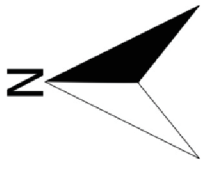
Nº PLANO:  
2

ESCALA  
1:1.000

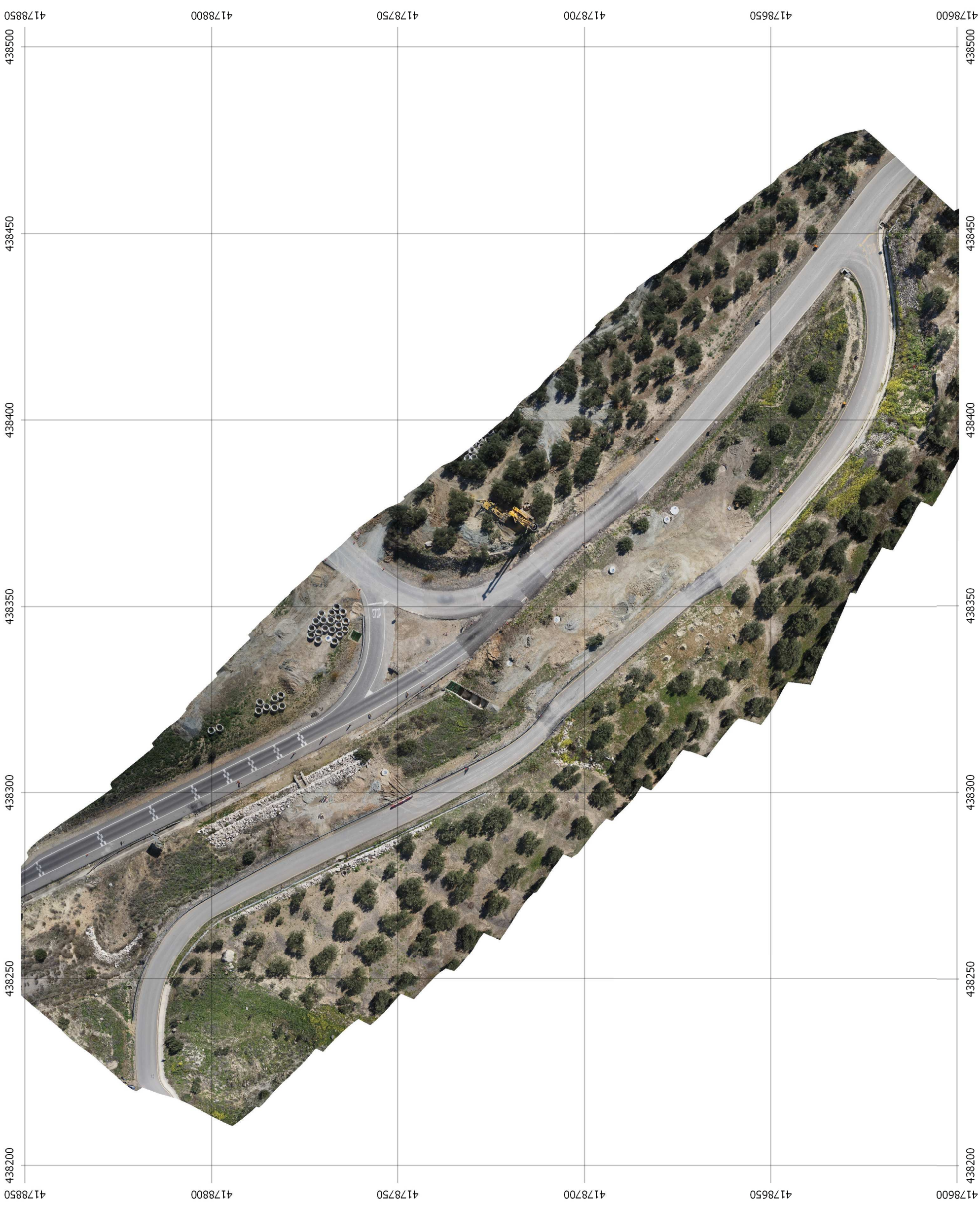
FORMATO UNE: A3  
10 0 10 20 30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015

# ORTOFOTOGRAFÍA (CAMPAÑA 20150327)



SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. ELIPSOIDE  
GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL.  
PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPULADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
ORTOFOTOGRAFÍA  
(CAMPAÑA 20150327)

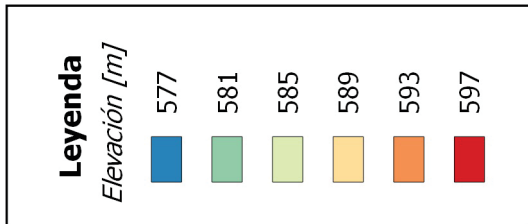
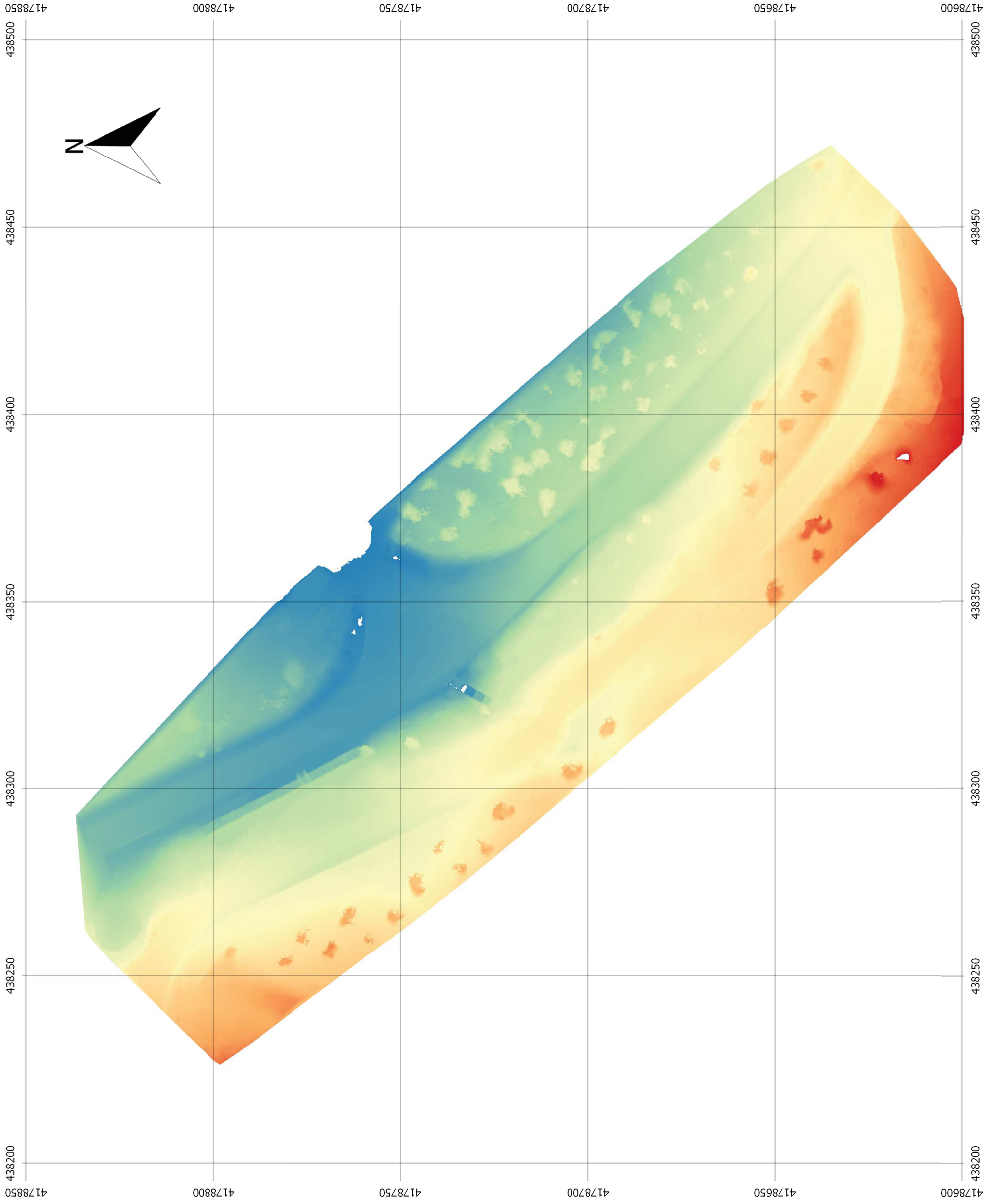
Nº PLANO:  
3

ESCALA  
1:1.000

FORMATO UNE: A3  
10 0 10 20 30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015

# MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (CAMPAÑA 20140117)



SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89. ELIPSOIDE GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL. PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPULADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES  
(CAMPAÑA 20140117)

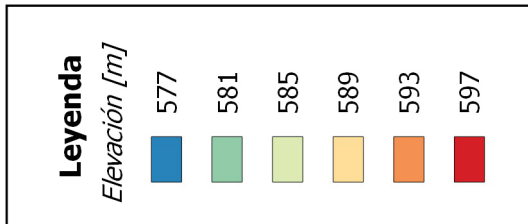
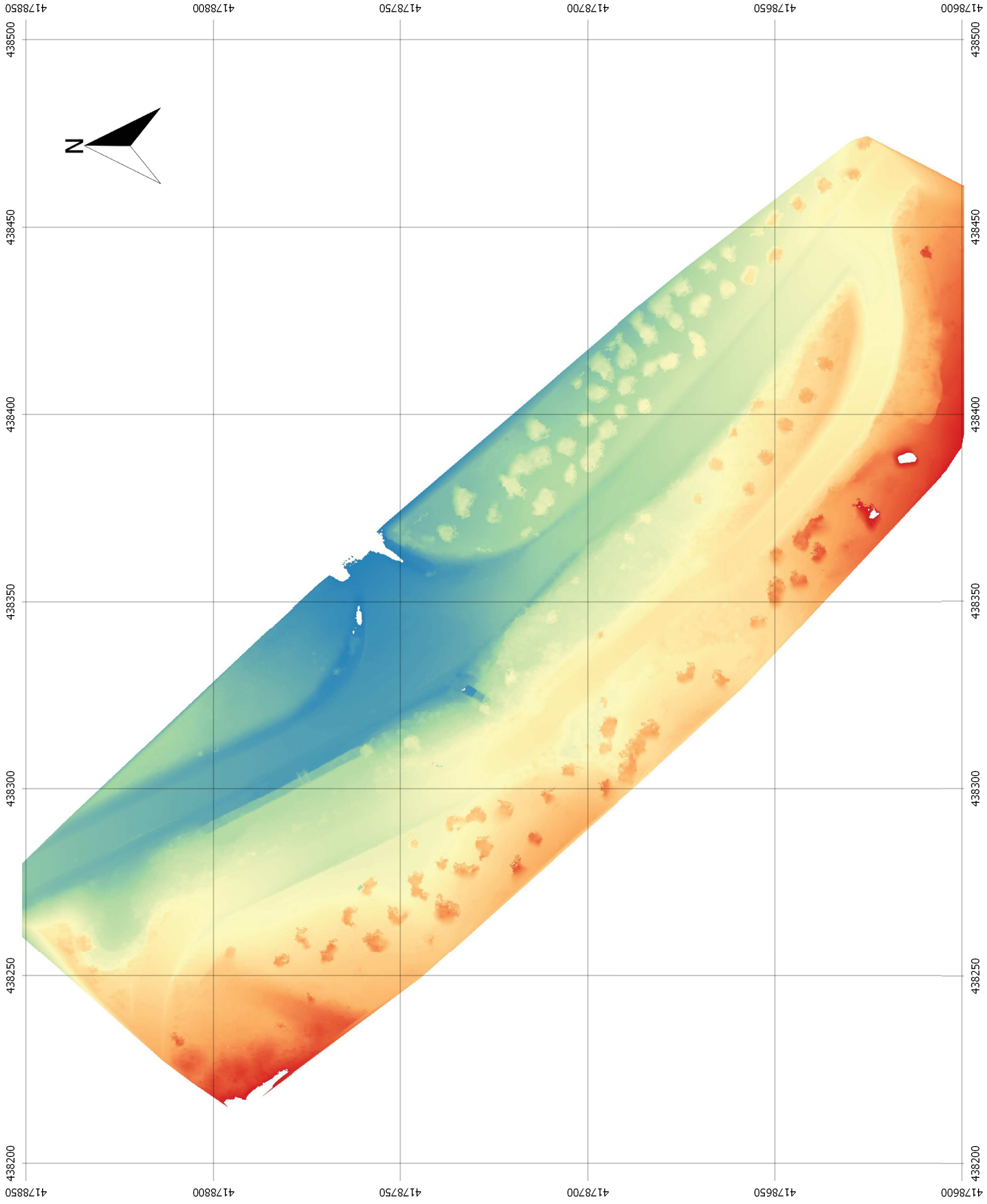
Nº PLANO:  
4

ESCALA  
1:1.000

FORMATO UNE: A3  
10 0 10 20 30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015

# MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (CAMPAÑA 20141223)



SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89, ELIPSOIDE GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL. PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPULADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES  
(CAMPAÑA 20141223)

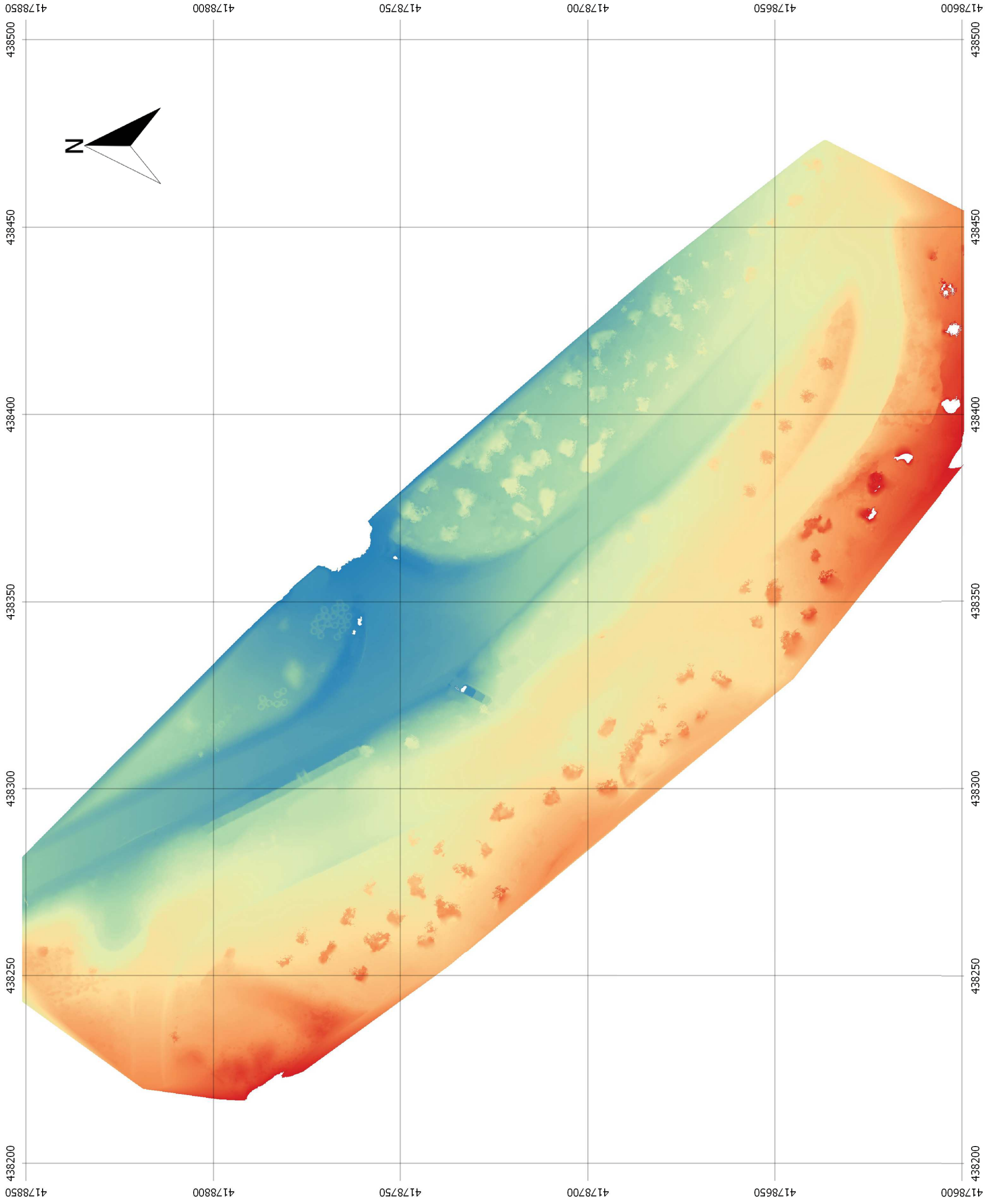
Nº PLANO:  
5

ESCALA  
1:1.000

FORMATO UNE: A3  
10 0 10 20 30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015

# MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (CAMPAÑA 20150327)



Leyenda	
Elevación [m]	
<span style="color: blue;">■</span>	577
<span style="color: green;">■</span>	581
<span style="color: yellow;">■</span>	585
<span style="color: orange;">■</span>	589
<span style="color: red;">■</span>	593
<span style="color: darkred;">■</span>	597

SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89, ELIPSOIDE GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL. PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPLULADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES  
(CAMPAÑA 20150327)

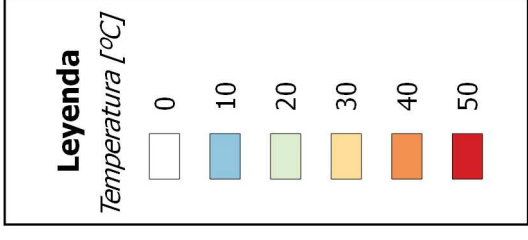
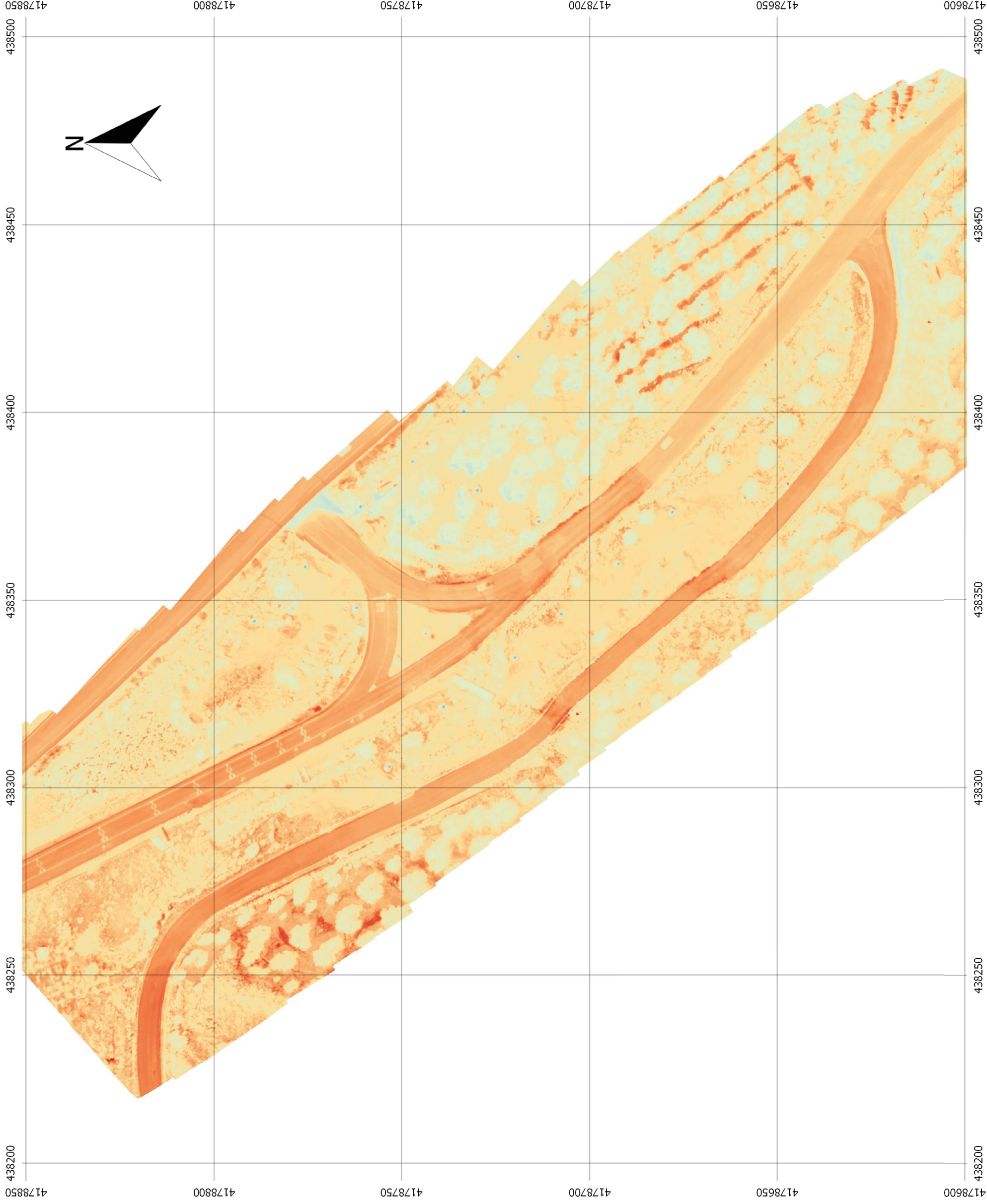
Nº PLANO:  
6

ESCALA  
1:1.000

FORMATO UNE: A3  
10 0 10 20 30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015

# MODELO DIGITAL DE TEMPERATURAS



SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89, ELIPSOIDE GRS80. SISTEMA DE ALTITUDES ELIPSOIDAL. PROYECCIÓN UTM HUSO 30.



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA

DEPARTAMENTO:  
INGENIERÍA CARTOGRÁFICA,  
GEODÉSICA Y FOTOGRAMETRÍA

ASIGNATURA:  
TRABAJO FIN DE  
GRADO

TÍTULO TFG:  
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE FIRMES  
DE CARRETERA MEDIANTE PLATAFORMAS  
AERÉAS NO TRIPLAZADAS (UAV)

DESIGNACIÓN PLANO:  
MODELO DIGITAL DE  
TEMPERATURAS

Nº PLANO:  
7

ESCALA  
1:1.000

FORMATO UNE: A3  
30 m

AUTOR:  
ANA GÓMEZ LÓPEZ  
FECHA:  
SEPTIEMBRE 2015