

JULIO  
2016

**MODELIZACIÓN TRIDIMENSIONAL  
MEDIANTE TÉCNICAS SFM DE VUELOS  
FOTOGRAMÉTRICOS ANTIGUOS.  
EVALUACIÓN DE POSIBILIDADES  
APLICADAS AL VUELO DE 1957.**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA GEODÉSICA  
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

*GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA*

*Macarena Parrizas Siles*

*Josep Eliseu Pardo Pascual*

---

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer la ayuda y opinión de Jaime Almonacid que me ha dado pies para comenzar a andar en PhotoScan y poder realizar la Fase 1 de éste estudio.

Gracias a los profesores Alfonso Fernández Sarriá, por su apoyo técnico y teórico durante todo el estudio, y a Matilde Balaguer Puig, por emplear su tiempo en ayudarme a buscar una alternativa y justificación en la parte fotogramétrica del estudio.

Agradecer a mi tutor, Josep Eliseu Pardo Pascual, la oportunidad que me ha dado de poder realizar un proyecto de estudio no contemplado anteriormente junto a él, puesto que, a pesar de ser un proyecto del que no se tenían grandes ideas de como abarcarlo, ha confiado en mí para su realización.

Mi tiempo de trabajo durante éste proyecto tampoco hubiese sido el mismo sin mis amigos, Marcel Buenaventura y Miguel Lorenzo Perales, los cuales han amainado los momentos de estrés y trabajo con pausas para café, canciones y su incondicional ayuda ante problemas.

Pero éste proyecto de verdad no hubiese sido el mismo sin esa persona que ha vivido junto a mi cada momento, cada duda, cada agobio y cada alegría que han ido surgiendo; calmándome, ayudándome a solucionar los problemas y dándome nuevas ideas para como abarcarlo. En definitiva, mi musa. Sinceramente, la solución final de dicho estudio no hubiese sido la misma sin la compañía de Adrián Castelló Martínez, a quien dedico todo mi trabajo realizado.

---

## RESUMEN

En la realización del presente proyecto, se pretende estudiar la obtención de Modelos Digitales de Superficies (MDS) y Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) utilizando la técnica *'Structure for Motion'* (SfM), aplicada mediante el software Agisoft-Photoscan sobre fotogramas antiguos con recubrimiento longitudinal entre ellos.

El objetivo es recuperar la configuración 3D de áreas actualmente modificadas por la acción humana. En el trabajo se aprenderá a usar la técnica SfM (con el programa indicado), generando así una nube de puntos a partir de los fotogramas iniciales. Dicho resultado se transformará generando un archivo en formato \*.las, del que, posteriormente, se eliminarán los elementos que se encuentren sobre la superficie terrestre (mediante el empleo del software FUSION). Finalmente, a partir del resultado obtenido, se generarán tanto un Modelo Digital de Elevaciones, como un Modelo Digital de Superficies que se podrán comparar con el modelo actual, así como evaluar la calidad del resultado obtenido mediante la utilización de análisis estadísticos. De esta manera podrán observarse los cambios tanto en el MDS como en el MDE a través del paso del tiempo.

La aplicación de la metodología explicada anteriormente se realizará sobre una recopilación de imágenes de un vuelo aéreo efectuado en el momento de la riada de 1957, correspondientes a una zona situada en el barranco de la castellana, dentro de los términos municipales de Llíria y Domeño.

Las imágenes en cuestión corresponden a un vuelo no oficial y han sido tratadas a posteriori, llegando a nosotros como fotogramas escaneados y modificados geoméricamente a través del recorte de los márgenes originales.

**Palabras clave:** Modelización 3D, Fotogramas antiguos, Detección de cambios, SfM

---

## RESUM

En la realització d'aquest projecte, es pretén estudiar l'obtenció de Models Digitals de Superfícies (MDS) i Models Digitals d'Elevacions (MDE) utilitzant la tècnica "Structure for Motion" (SfM), aplicada mitjançant el software Agisoft-Photoscan sobre fotogrames antics amb recobriment longitudinal entre ells.

L'objectiu és recuperar la configuració 3D d'àrees actualment modificades per l'acció humana. En el treball s'aprendrà a utilitzar la tècnica SfM (amb el programa indicat), generant així un núvol de punts a partir dels fotogrames inicials. Aquest resultat es transformarà tot generant un arxiu en format \*.las del qual, posteriorment s'eliminaran els elements que s'hi troben sobre la superfície terrestre (mitjançant l'ús del software FUSION). Finalment, a partir del resultat obtingut, es generaran tant un Model Digital d'Elevacions com un Model Digital de Superfícies, les quals es podran comparar amb el model actual. D'altra banda, també es podrà avaluar la qualitat del resultat obtingut mitjançant la utilització d'anàlisi estadístics. D'aquesta manera es podran observar els canvis, tant en el MDS com en el MDE a través del pas del temps.

L'aplicació de la metodologia explicada anteriorment es realitzarà sobre una recopilació d'imatges d'un vol aeri efectuat en el moment de la riuada de 1957, corresponents a una zona situada en el barranc de La Castellana, dins dels termes municipals de Lliria i Domeño.

Les imatges en qüestió corresponen a un vol no oficial i han estat tractades a posteriori. Aquestes han arribat a nosaltres com a fotogrames escanejats i modificats geomètricament a través del retall dels marges originals.

**Paraules clau:** Modelització 3D, Fotogrames antics, Detecció de canvis, SfM

---

## ABSTRACT

Through the realization of this Thesis, the intention is to study the production of Digital Surface Models (DSM) and Digital Elevation Models (DEM) using the technique 'Structure from Motion' (SfM), applied by Agisoft-Photoscan software on old aerial photographs with longitudinal overlapping.

The goal is to recover the 3D configuration of areas currently modified by human action. In this thesis it will be explained how to use the SfM technique (with the indicated software), generating a point cloud from the initial images. This result will be converted generating a file in \*.las format, from which the elements that remain over the earth's surface will be deleted (by using FUSION software). Finally, from the result, either a Digital Elevation Model, as a Digital Surface Model will be generated, allowing the comparison with the current model. Furthermore, the quality of the result obtained will be evaluated by using statistical analysis. By this way, changes can be evaluated in both the MDS and MDE through the time.

The application of the methodology explained above is carried out on a collection of images of an air flight made at the time of the flood of 1957, corresponding to an area located in the gorge named 'Barranco de la Castellana', within the municipalities of Lliria and Domeño.

The images of the study correspond to an unofficial flight and have been treated after it, coming to us as scanned frames and geometrically modified by cutting the original margins.

**Key words:** 3D Modelling, Old Photographs, Change detection, SfM

## ÍNDICE GENERAL

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓN .....   | 11 |
| 1.1.   | Antecedentes .....   | 11 |
| 1.1.1. | Importancia de la acción humana reciente en los cauces fluviales. .... | 11 |
| 1.1.2. | 14 de octubre de 1957. El día que la Riada devastó Valencia.....       | 11 |
| 1.1.3. | Métodos para la obtención de MDT mediante fotogrametría .....          | 12 |
| 1.2.   | Motivación .....   | 14 |
| 1.3.   | Objetivos .....  | 15 |
| 2.     | ZONA DE ESTUDIO.....   | 16 |
| 3.     | MATERIAL DISPONIBLE.....   | 17 |
| 3.1.   | Serie de fotografías .....   | 17 |
| 3.2.   | Otros datos utilizados.....  | 18 |
| 3.3.   | Herramientas empleadas .....   | 19 |
| 4.     | METODOLOGÍA.....   | 21 |
| 4.1.   | FASE 1. Proceso de Tratamiento de Datos Brutos .....                   | 21 |
| 4.1.1. | Obtención de la realidad terreno o puntos de control .....             | 21 |
| 4.1.2. | Orientación de las imágenes y creación de la nube de puntos 3D .....   | 23 |
| 4.1.3. | Creación de la malla y textura.....                                    | 26 |
| 4.1.4. | Exportación de datos.....  | 28 |
| 4.2.   | FASE 2. Tratamiento de datos espaciales.....                           | 30 |
| 4.2.1. | Eliminación de outliers .....  | 30 |
| 4.2.2. | Creación del MDS .....   | 34 |
| 4.2.3. | Creación del MDE .....   | 36 |
| 5.     | ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS RESULTADOS Y ESTUDIOS REALIZADOS.....          | 39 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.1.   | Análisis crítico de la nube de puntos.....                          | 39 |
| 5.1.1. | Análisis de la nube de puntos sin filtrar .....                     | 39 |
| 5.1.2. | Análisis crítico de la nube de puntos filtrada .....                | 43 |
| 5.1.3. | Comparativa de estadísticas .....                                   | 43 |
| 5.1.4. | Resultado del modelo procesado con la nube de puntos filtrada ..... | 44 |
| 5.2.   | Análisis crítico del MDE/MDS obtenido .....                         | 45 |
| 5.2.1. | Delimitación de la zona de estudio .....                            | 45 |
| 5.2.2. | Generación de perfiles transversales.....                           | 47 |
| 5.2.3. | Estudio de puntos aleatorios.....                                   | 51 |
| 5.3.   | Estimación del error del MDS obtenido.....                          | 57 |
| 5.4.   | Estudio de diferencias volumétricas .....                           | 60 |
| 5.5.   | Análisis de alternativas metodológicas de la fase 1.....            | 62 |
| 6.     | APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS.....                                   | 66 |
| 7.     | DISCUSIÓN.....  | 67 |
| 8.     | CONCLUSIONES .....  | 68 |
| 9.     | GLOSARIO .....  | 69 |
| 10.    | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                    | 71 |
|        | ANEXO DE PLANOS.....  | 72 |
| 1.     | PLANO DE SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO .....                            | 73 |
| 2.     | PLANO DE RESULTADO MDE 1957 OBTENIDO .....                          | 74 |
| 2.     | PLANO DE RESULTADO MDE 1957 OBTENIDO .....                          | 75 |
| 3.     | PLANO DE RESULTADO MDS 1957 OBTENIDO .....                          | 76 |
| 4.     | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-107N.....                               | 77 |
| 5.     | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-108N.....                               | 78 |



|     |   |    |
|-----|---|----|
| 6.  | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-109N.....                     | 79 |
| 7.  | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-110N.....                     | 80 |
| 8.  | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-111N.....                     | 81 |
| 9.  | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-112N.....                     | 82 |
| 10. | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-113N.....                     | 83 |
| 11. | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-114N.....                     | 84 |
| 12. | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-115N.....                     | 85 |
| 13. | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-116N.....                     | 86 |
| 14. | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-117N.....                     | 87 |
| 15. | FOTOGRAFÍA AÉREA A57-357 P4-118N.....                     | 88 |
| 16. | MAPA DE CAMBIOS 1957 – 2009 (Parte 1/2).....              | 89 |
| 17. | MAPA DE CAMBIOS 1957 – 2009 (Parte 2/2).....              | 90 |
| 18. | MAPA DE CAMBIOS VOLUMÉTRICOS 1957 – 2009 (Parte 1/2)..... | 91 |
| 19. | MAPA DE CAMBIOS VOLUMÉTRICOS 1957 – 2009 (Parte 2/2)..... | 92 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Estadísticas del modelo sin filtrar ..... | 44 |
| Tabla 2: Estadísticas del modelo filtrado .....    | 44 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1: Perfil 1 sobre el barranco y las zonas colindantes.....                              | 49 |
| Gráfico 2: Perfil 2 sobre el barranco y las zonas colindantes.....                              | 49 |
| Gráfico 3: Perfil 3 sobre el barranco y las zonas colindantes.....                              | 50 |
| Gráfico 4: Perfil 4 sobre el barranco y las zonas colindantes.....                              | 50 |
| Gráfico 5: Perfil 5 sobre el barranco y las zonas colindantes.....                              | 51 |
| Gráfico 6: Perfil 6 sobre el barranco y las zonas colindantes.....                              | 51 |
| Gráfico 7: Histograma de los puntos aleatorios sin eliminar puntos extremos.....                | 53 |
| Gráfico 8: Histograma de los puntos aleatorios tras eliminar valores extremos.....              | 58 |
| Gráfico 9: Gráfico cuantil-cuantil de los puntos aleatorios tras eliminar valores extremos..... | 58 |
| Gráfico 10: Diagrama de caja y bigotes de los puntos aleatorios sin valores extremos .....      | 59 |
| Gráfico 11: Gráfico de evolución de diferencias volumétricas .....                              | 61 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1: Crecida del río Turia de 1957 sobre el Puente del Mar.....                 | 12 |
| Ilustración 2: Ejemplo del funcionamiento del algoritmo SfM .....                         | 13 |
| Ilustración 3: Localización de las fotografías, situadas al oeste de Lliria .....         | 16 |
| Ilustración 4: Fotografía aérea A57-357 P4-114N.....                                      | 18 |
| Ilustración 5: MDE LIDAR con resolución de 1 metro, descargado desde Terrasit (ICV) ..... | 18 |
| Ilustración 6: Ortofoto del PNOA para la zona de estudio, descargado desde el CNIG.....   | 19 |
| Ilustración 7: Distribución de puntos de control y recubrimiento.....                     | 22 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 8: Alineación automática de las fotografías .....   | 24 |
| Ilustración 9: Situación de los puntos de control.....  | 24 |
| Ilustración 10: Resultados de la orientación externa previos a la eliminación de puntos con error elevado ..... | 25 |
| Ilustración 11: Resultado de la generación de la nube de puntos densa .....                                     | 25 |
| Ilustración 12: Modelo 3D visualizado mediante sombreado a color .....  | 26 |
| Ilustración 13: Modelo 3D visualizado mediante sombreado monocromático.....                                     | 26 |
| Ilustración 14: Modelo 3D visualizado mediante malla de alambre.....  | 27 |
| Ilustración 15: Modelo con textura en opción de mezcla ortofoto .....   | 28 |
| Ilustración 16: Espacio de trabajo en PhotoScan.....  | 29 |
| Ilustración 17: Visualización de la nube de puntos 3D mediante PDQ e identificación de outliers .....           | 30 |
| Ilustración 18: Nube de puntos tras aplicar el algoritmo FilterData.....  | 32 |
| Ilustración 19: Datos de la cabecera del archivo de la nube de puntos 3D .....                                  | 33 |
| Ilustración 20: Nube de puntos tras aplicar el filtrado mediante el algoritmo ClipData .....                    | 34 |
| Ilustración 21: Modelo Digital de Superficies tras aplicar el algoritmo CanopyModel.....                        | 35 |
| Ilustración 22: Modelo Digital de Elevaciones tras aplicar el algoritmo GridSurfaceCreate .....                 | 38 |
| Ilustración 23: Fragmento de la tabla de atributos con los valores del MDE actual extraídos... 40               | 40 |
| Ilustración 24: Fragmento del campo de diferencia entre MDEs .....  | 41 |
| Ilustración 25: TIN Generado a partir de la nube de puntos mediante ArcGIS .....                                | 42 |
| Ilustración 26: Resultado de la diferencia entre el modelo sin filtrar y el modelo actual .....                 | 43 |
| Ilustración 27: Resultado de la diferencia entre el modelo filtrado y el modelo actual.....                     | 43 |
| Ilustración 28: MDS con sombreado donde se aprecian las bandas (recuadros rojos).....                           | 44 |
| Ilustración 29: Error de alabeo en la orientación de las cámaras .....  | 45 |
| Ilustración 30: Acotación de la zona de estudio .....   | 46 |
| Ilustración 31: Acotación de la zona del barranco .....   | 47 |
| Ilustración 32: Localización de los diferentes perfiles transversales a lo largo de la zona de estudio.....     | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 33: Resultado de la simbolización de los puntos aleatorios: .....                               | 52 |
| Ilustración 34: Punto extremo 1 en 1957.....  | 54 |
| Ilustración 35: Punto extremo 1 en 2009.....  | 54 |
| Ilustración 36: Punto extremo 6 en 1957.....  | 54 |
| Ilustración 37: Punto extremo 6 en 2009.....  | 54 |
| Ilustración 38: Sombreado en punto extremo 1 en 1957 .....  | 54 |
| Ilustración 39: Sombreado en punto extremo 6 en 1957 .....  | 54 |
| Ilustración 40: Punto extremo 2 en 1957.....  | 55 |
| Ilustración 41: Punto extremo 2 en 2009.....  | 55 |
| Ilustración 42: Punto extremo 3 en 1957.....  | 55 |
| Ilustración 43: Punto extremo 3 en 2009.....  | 55 |
| Ilustración 44: Punto extremo 5 en 1957.....  | 55 |
| Ilustración 45: Punto extremo 5 en 2009.....  | 55 |
| Ilustración 46: Punto extremo 4 en 1957.....  | 56 |
| Ilustración 47: Punto extremo 4 en 1957.....  | 56 |
| Ilustración 48: Sombreado en punto extremo 4 en 1957 .....  | 56 |
| Ilustración 49: Puntos aleatorios tras la eliminación de los extremos .....                                 | 57 |
| Ilustración 50: Explicación gráfica del diagrama de caja y bigotes .....                                    | 59 |
| Ilustración 51: Ejemplo de fotografía enmascarada .....   | 63 |
| Ilustración 52: Resultado tras aplicar el filtro lineal.....  | 64 |
| Ilustración 53: Resultado tras aplicar el filtro ecualizador .....  | 64 |
| Ilustración 54: Azulejo indicando la cota del agua en la riada, situado en Carrer del Museu, Valencia ..... | 68 |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1. Importancia de la acción humana reciente en los cauces fluviales.

Los lechos de los ríos son ambientes sumamente cambiantes que están sujetos a rápidos procesos de erosión y acumulación relacionados con la dinámica hidráulica de los flujos de agua que los recorren. Los cambios que se producen en estos espacios son sumamente rápidos durante los momentos de crecida, si bien no siempre son perceptibles dado que en la propia crecida hay una fase erosiva a la que le sigue otra acumulativa. Sin embargo, en algunos momentos determinados, se pueden producir modificaciones sustanciales en la forma del lecho que perduran en el tiempo y que, muchas veces pueden tener consecuencias subsiguientes sobre las áreas inmediatas. Así, la incisión erosiva en un punto de un cauce provoca, casi siempre una respuesta de contagio río arriba debido al efecto de la erosión remontante, provocando muchas veces problemas graves de descalce de determinadas infraestructuras (como los puentes). Estos fenómenos, muchas veces tienen un origen antrópico, relacionado con masivas extracciones de los sedimentos del fondo de los ríos (sobre todo en cauces trenzados o braided) o áridos-para distintos usos. En el ámbito valenciano, este tipo de actividad no ha sido, ni mucho menos rara o infrecuente y, por ello, a veces sorprende reconocer cambios morfológicos de grandes magnitudes en algunas de nuestras ramblas. El caso que aquí se presenta se encuadraría en esa circunstancia.

#### 1.1.2. 14 de octubre de 1957. El día que la Riada devastó Valencia

La catastrófica crecida del río Turia en la ciudad de Valencia el día 14 de octubre de 1957 fue posiblemente una de las mayores de su historia y tuvo una enorme repercusión en los medios de comunicación nacionales e internacionales. La dimensión del desastre marcó profundamente la vida de la ciudad y sigue siendo un hito de su historia más reciente. Varios trabajos analizaron los datos climáticos (GARCÍA y CARRASCO, 1958) e hidrológicos (CÁNOVAS, 1958) del suceso. También se editaron noticias en revistas técnicas (PROPIEDAD Y CONSTRUCCIÓN, 1960) y en la prensa local (diarios Levante y Las Provincias). Este material, junto con la gran cantidad de fotografías públicas y privadas tomadas durante el episodio, constituye una valiosa fuente de información ampliamente difundida. Desde entonces la riada de 1957 no ha dejado de estar presente en la planificación de la ciudad y su área metropolitana.

Desde la década de los 90, el suceso de la riada de Valencia, volvió a cobrar vida en forma de exposiciones, libros y publicaciones periodísticas y fotográficas del desastre, logrando así que la documentación existente tomada durante la riada cobrase gran difusión. Sin embargo, no hubo destacables avances en un posible reanálisis hidrogeomorfológico de la riada.

Durante la década de los 50, se produjo una cesión tecnológica por parte de EEUU a España, entre las que se encuentra el conocido Vuelo Americano (1956-1957). No obstante, además de dicho vuelo, también se produjeron otros que, pese a ser menos conocidos y haber permanecido en el anonimato, vieron la luz tras una búsqueda intensa entre diversos archivos. Dichos vuelos anónimos, constituyen una documentación valiosísima para el estudio del episodio mediante

fotogramas de alta resolución con alto solape, ya que se efectuaron poco tiempo después de la inundación, cuando el cauce del río Turia aún mantenía gran parte de la crecida.



*Ilustración 1: Crecida del río Turia de 1957 sobre el Puente del Mar*

### 1.1.3. Métodos para la obtención de MDT mediante fotogrametría

- Métodos Clásicos

La Fotogrametría, definida como la ciencia, arte y tecnología de obtener información fiable de los objetos y su entorno mediante el registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas y datos obtenidos a partir de energía electromagnética radiante y otros fenómenos, según el Manual de la Sociedad Americana de Fotogrametría, ha usado casi desde sus inicios a la fotografía como fuente primaria de información.

La fotografía no es más que el registro del haz perspectivo de rayos generados por el objeto por medio de una cámara métrica. El uso de la fotografía como fuente de información, aporta ventajas que no proporcionan los métodos de topografía clásica:

- El registro es total, continuo y objetivo.
- Tiene un alto rendimiento.
- Es un método indirecto, es decir, no interacciona con el objeto a medir.
- Es de fácil manejo y conservación.
- Aporta información tanto cualitativa como cuantitativa.

Pero todas las ventajas que se derivan de las posibilidades de este tipo de registro no tendrían sentido si no existiera un método que nos permitiera pasar de la información bidimensional, proporcionadas por las fotografías a la información tridimensional que necesitamos para determinar la forma, dimensiones y posición en el espacio del objeto de nuestro estudio.

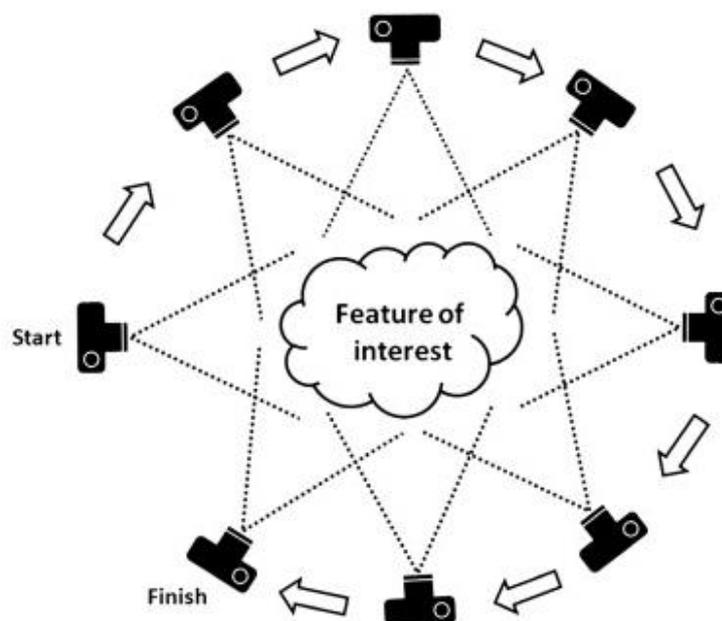
Este método conocido con el nombre de Método General de la Fotogrametría, para el que es necesario dos fotografías tomadas desde dos puntos de vistas diferentes y a partir de la reconstrucción de la forma de cada uno de los haces y de su situación en el espacio con respecto a un cierto sistema de referencia, es capaz de proporcionarnos las coordenadas de cada uno de los puntos objeto.

El presente método es generalmente atribuido a la fotogrametría aérea clásica, sin embargo, en la actualidad también se utiliza tanto en el empleo de plataformas aerotransportadas no tripuladas, como en la realización de fotogrametría del objeto cercano, muy importante en proyectos de restauración arquitectónica y documentación del patrimonio cultural.

- Nuevos métodos (SfM)

El método Structure-from-Motion (SfM), es un método fotogramétrico de bajo coste para la reconstrucción topográfica de alta resolución, adecuado para investigación de bajo coste y aplicaciones en áreas remotas. El algoritmo SfM opera bajo los mismos principios básicos que la fotogrametría estereoscópica, es decir, las estructuras 3D pueden resolverse a partir de series de solapamiento entre imágenes. Sin embargo, se diferencia fundamentalmente de la fotogrametría clásica en que, la geometría de la escena, las posiciones de la cámara y la orientación, se resuelven automáticamente sin necesidad de especificar previamente una red de elementos con coordenadas tridimensionales conocidas. En cambio, todos los parámetros anteriormente mencionados, son resueltos utilizando un procedimiento de ajuste de haces iterativo con un elevado número de redundancias, basado en una base de datos de elementos extraídos automáticamente de un set de múltiples imágenes con solape (Snavely, 2008).

Como se explica a continuación, el enfoque es más adecuado para conjuntos de imágenes con un alto grado de solapamiento que capturen la estructura tridimensional completa de la escena observada desde una amplia variedad de posiciones, dando así el nombre a la técnica, ya que las imágenes derivan de un sensor en movimiento (*Ilustración 2*).



*Ilustración 2: Ejemplo del funcionamiento del algoritmo SfM*

Esta técnica fue desarrollada en la década de 1990 y tiene su origen en la comunidad de visión por computador (*p. ej. Spetsakis and Aloimonos, 1991, Boufama et al., 1993 y Szeliski and Kang, 1994*) y el desarrollo de algoritmos automáticos de búsqueda de entidades homólogas en la década anterior (*p. ej. Förstner, 1986 and Harris and Stephens, 1988*). Este algoritmo empezó a popularizarse gracias a la aparición de software de procesamiento en la nube, siendo 'Microsoft Photosynth' el más conocido. Utilizando estas herramientas, el usuario podía subir el conjunto de fotografías necesario para cubrir el objeto o escena a la nube y, automáticamente, el software calculaba la nube dispersa de puntos 3D a partir de dichas fotografías.

- Principios de SfM

La posición de las cámaras y la geometría de la escena son reconstruidas simultáneamente a través de la identificación automática de entidades homólogas en múltiples imágenes. Mediante el seguimiento de dichas entidades homólogas en cada una de las imágenes, se estiman las posiciones iniciales de la cámara, así como las coordenadas del objeto, las cuales serán refinadas siguiendo un ajuste no lineal de mínimos cuadrados iterativo.

A diferencia de la fotogrametría tradicional, las posiciones de la cámara derivadas del algoritmo SfM, no cuentan con la escala y la orientación proporcionadas por las coordenadas de los puntos de control. Como consecuencia, la nube de puntos 3D se genera en coordenadas relativas, referentes al sistema de coordenadas imagen. La georreferenciación de dicho modelo se lleva a cabo, generalmente, utilizando un reducido número de puntos de control situados en elementos claramente visibles tanto en la nube de puntos como en el terreno y en cada una de las imágenes.

## 1.2. Motivación

Recientemente se ha descubierto una serie de fotografías aéreas que muestran un solape longitudinal de una zona del barranco del río Turia, pocos días después de la crecida del mismo en el año 1957. La importancia de dichas fotografías se basa en que nunca antes habían sido tratadas ni estudiadas. Esto es de vital importancia ya que, como ingeniera en Geomática y Topografía, resulta de gran interés el estudio de las posibilidades que pueden aportar las imágenes encontradas para la documentación de una catástrofe de gran relevancia histórica como es la Riada de 1957. Dichas imágenes constituyen una documentación inédita del acontecimiento y resulta de gran interés la obtención de productos que faciliten el posible estudio hidrográfico y geomorfológico a posteriori.

No obstante, como se detallará en los siguientes apartados, las imágenes de las que se dispone son de dudosa calidad, por lo que resulta todo un reto la obtención de un modelo tridimensional óptimo que posibilite los estudios antes mencionados.

Con el objetivo de garantizar la calidad del modelo, se realizará un análisis estadístico de los resultados, demostrando que la Geomática es una ciencia que ofrece, no solo resultados visualmente impactantes, sino también productos de gran calidad métrica y con una precisión avalada por la estadística.

### 1.3. Objetivos

Para la realización del siguiente proyecto, se han considerado una serie de propósitos a cumplir, los cuales permitan alcanzar la finalidad del proyecto, es decir, el estudio del cambio morfológico en el cauce del río Turia, así como dejar la puerta abierta a futuros estudios en el campo de la fotogrametría, donde el material disponible para la generación de modelos tridimensionales dificulte la obtención de los mismos.

Entre los objetivos de este proyecto se encuentra, en primer lugar, es el análisis de la potencialidad que ofrece la técnica SFM en la obtención de resultados a partir de imágenes aéreas antiguas que han sido modificadas geométricamente, careciendo así de los parámetros necesarios para la orientación interna. Valorando así si el producto generado mediante dicha técnica sirve para el propósito de realizar análisis críticos de los cambios en el ámbito de los cauces fluviales.

En segundo lugar, se busca estimar el nivel de precisión que puede llegar a obtenerse tras el proceso de extracción de información tridimensional a partir de las imágenes aéreas, realizando un análisis exhaustivo de la métrica y la precisión de los resultados obtenidos

Finalmente, con el objetivo de mostrar información gráfica de fácil y rápida comprensión, se realizarán diversos mapas de cambios habidos en el segmento fluvial estudiado entre 1957 y 2009, utilizando para ello el MDE LIDAR de 1 metro realizado en 2009, sobre el que se compararán los resultados obtenidos, evaluando así de forma gráfica las zonas donde se produjo la riada.

## 2. ZONA DE ESTUDIO

El Turia, llamado también en su primer tramo Guadalaviar (*wadi al-abyad 'río blanco'*) desde el siglo X, es un río situado en el este de la península ibérica. Discurre por un trayecto aproximado que quedaría comprendido entre los 243 y los 296 kilómetros de longitud si tenemos en cuenta todo su recorrido. Tiene su origen en unos manantiales que brotan de la villa de Guadalaviar en la partida de los Majadales. Nace en la Muela de San Juan, entre la Sierra de Albarracín y los Montes Universales, cerca de la población de Guadalaviar, en la provincia de Teruel de donde recibe su nombre a unos 1680 metros de altitud. Fueron historiadores y geógrafos clásicos, tales como Ptolomeo, los que llamaron al Turia 'Turulis'.

En la margen oriental de la Muela de San Juan muy cerca del nacimiento del río Júcar y del castellano Tajo comienza su lento discurrir. Desde las laderas meridionales de la Muela de San Juan en su nacimiento transcurre por angostos valles para llegar a Guadalaviar donde sus aguas se pierden en parte a través de las calizas kársticas. Su recorrido supera los 250 kilómetros hasta desaguar en la huerta de Valencia.

La cuenca del Turia tiene una superficie de 6348 km<sup>2</sup>. Fisiográficamente se describe como una zona interior montañosa y una zona litoral costera. Presenta un clima semiárido con una precipitación media de 402 mm/año y una evapotranspiración potencial de 91 mm/mes.

La zona de estudio sobre la que se centra este trabajo se encuentra dentro del término municipal de Lliria, atravesando parte del término municipal de Domeño. El área total estudiada comprende una longitud de 7.341 km, aproximadamente. El estudio se centra, en el barranco formado por el cauce del río Turia, concretamente, en el área referente a la Rambla Castellana. El emplazamiento del estudio, puede consultarse gráficamente en el mapa de situación y emplazamiento del Anexo de planos.

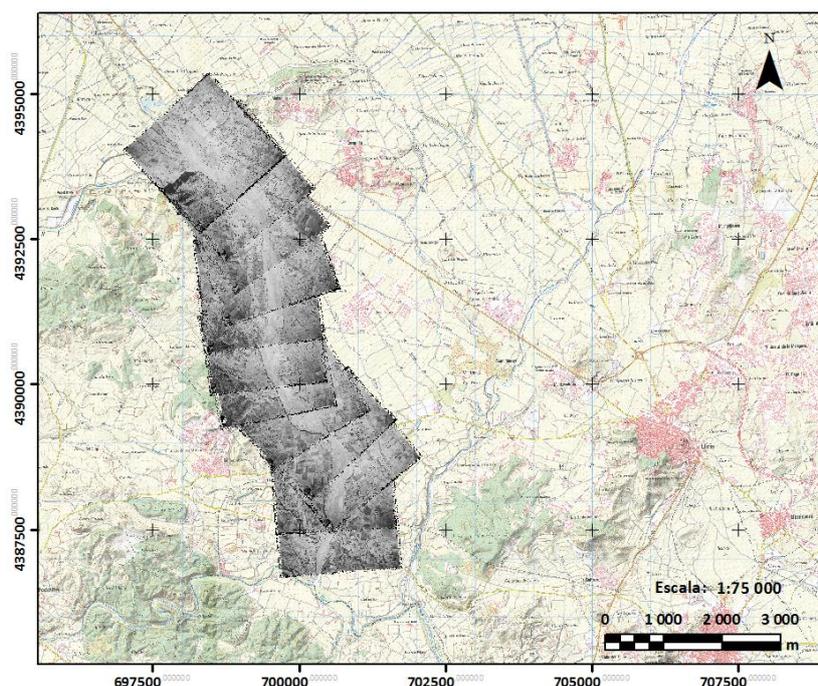


Ilustración 3: Localización de las fotografías, situadas al oeste de Lliria

### 3. MATERIAL DISPONIBLE

#### 3.1. Serie de fotografías

La crecida del río Turia tuvo una enorme repercusión en el territorio de Valencia. La dimensión del desastre provocó la necesidad de documentar lo sucedido, por ello, entre el escaso material disponible con el que se cuenta en la actualidad, se han encontrado una serie de fotografías de un vuelo aéreo en el mismo momento en que el río Turia mostraba la crecida del desastre producido. Las fotografías con las que se va a trabajar se tomaron a los pocos días de la riada y, por ello, tienen un valor documental incalculable, dado que nos informan de cómo estaba el sector de río a analizar en ese preciso instante. Este hecho es clave para entender por qué se busca aprovechar la información inherente a estas imágenes a pesar de las muchas dificultades y limitaciones que, por otra parte, tienen las mismas.

De hecho, la información con la que se cuenta en las fotografías del estudio es mínima. No se conocen los datos de calibración de la cámara fotogramétrica referentes a la longitud focal, las coordenadas de intersección del eje de la lente óptica con el plano del sensor, el coeficiente de inclinación y las correcciones de distorsión radial y tangencial. Tampoco se conoce la altura de vuelo con la que fueron tomadas las imágenes.

Las imágenes muestran una calidad dudosa, la información radiométrica de las mismas varía entre éstas, mostrando diferente cantidad de brillo y luminosidad entre fotografías consecutivas, como si éstas se hubiesen tomado a diferente altura de vuelo. También, cabe destacar que, en la época de toma de las imágenes, no se contaba con un sistema inercial en la cámara fotogramétrica aérea que recogiese los giros producidos para la toma de éstas. No tener un sistema inercial produce no contar con datos para las correcciones de las imágenes, por ello, éstas muestran una distorsión radial en los bordes de las mismas. Esto produce que se pierda gran cantidad de la información contenida en el fotograma y únicamente sea posible centrarse en la extracción de ésta referente a los datos de la zona central de las imágenes.

Otro hecho importante es que la información geométrica de los fotogramas ha variado puesto que no están completos. Se ve un claro recorte de éstos ya que las imágenes no muestran las marcas fiduciales propias del resultado de la toma en vuelos fotogramétricos. Éstas marcas en los fotogramas representan la parte necesaria para realizar la orientación interna del proceso fotogramétrico. La ausencia de éstas marcas genera la necesidad de buscar otras técnicas para la orientación de las imágenes.

Pero, a pesar de todo ello, éstas muestran un buen solape longitudinal y la información de ellas se centra en la continuidad del barranco, por lo que puede aportar información importante para ayudar a documentar el cambio hidrológico y geomorfológico de la inundación de 1957, así como el impacto de la acción antrópica en dicho proceso en el ámbito de la ciudad de Valencia, correspondiente a la agricultura y superficie de huerta valenciana.

El estudio se realiza con una muestra de 12 fotografías de la serie, que van desde la fotografía número A57-357 P4-107N a la fotografía A57-357 P4-118N (*Ilustración 4*), pero el proceso es totalmente extrapolable al resto de imágenes de la serie. El vuelo completo es bastante más extenso, no obstante, para el presente estudio, era necesario evaluar previamente el nivel de utilidad que realmente se le puede dar a este material.



Ilustración 4: Fotografía aérea A57-357 P4-114N

### 3.2. Otros datos utilizados

Ha sido necesario disponer de información de calidad cartográfica actual para poder georreferenciar las fotografías antiguas y, también, para poder evaluar los cambios que realmente se han producido a lo largo de estos prácticamente 60 años. Por tanto, se ha usado el MDE de 1 m de resolución y las ortofotos de medio metro de píxel.

- MDE LIDAR 1m

Modelo digital de elevaciones con paso de malla de 1 metro de tamaño de píxel, en formato ERS. El MDE se encuentra representada en el sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM Zona 30N. Descargado desde el servicio de descargas Terrasit del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV) (Ilustración 5).

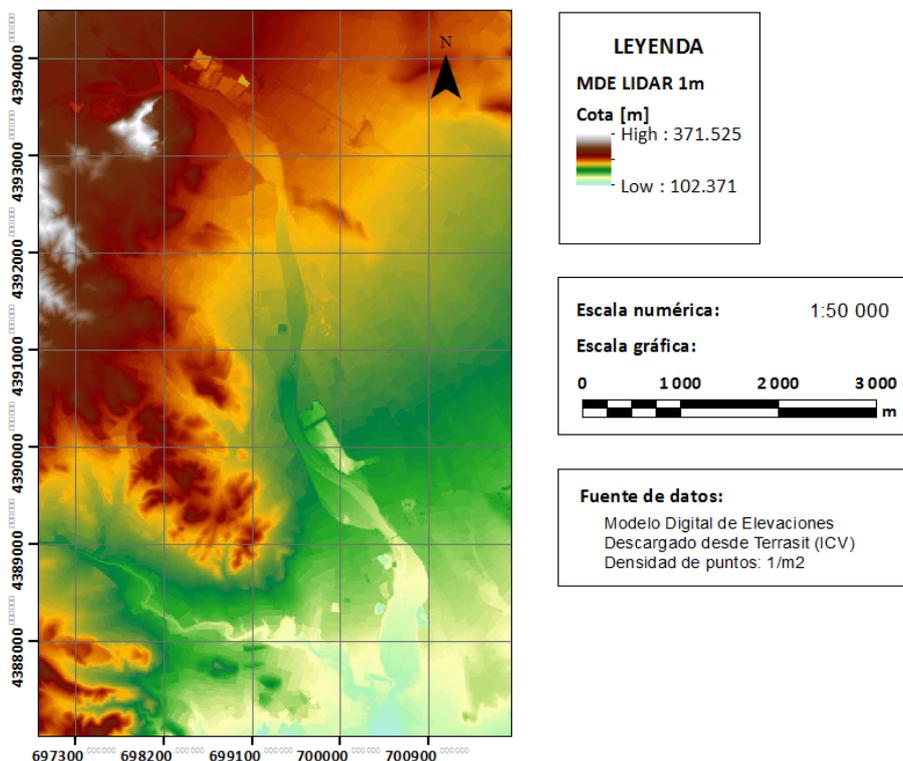


Ilustración 5: MDE LIDAR con resolución de 1 metro, descargado desde Terrasit (ICV)

- Ortofoto PNOA

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) es un proyecto cofinanciado y cooperativo entre la Administración General del Estado (AGE) y las comunidades autónomas que se enmarca dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), siendo coordinado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Tiene como objetivo la obtención de productos fotogramétricos comunes para todo el territorio nacional, con especificaciones técnicas consensuadas entre todas las administraciones implicadas y cuyo resultado es el proceso y obtención de ortofotografías digitales, incluyendo el vuelo fotogramétrico, apoyo de campo, aerotriangulación y el modelo digital de elevaciones.

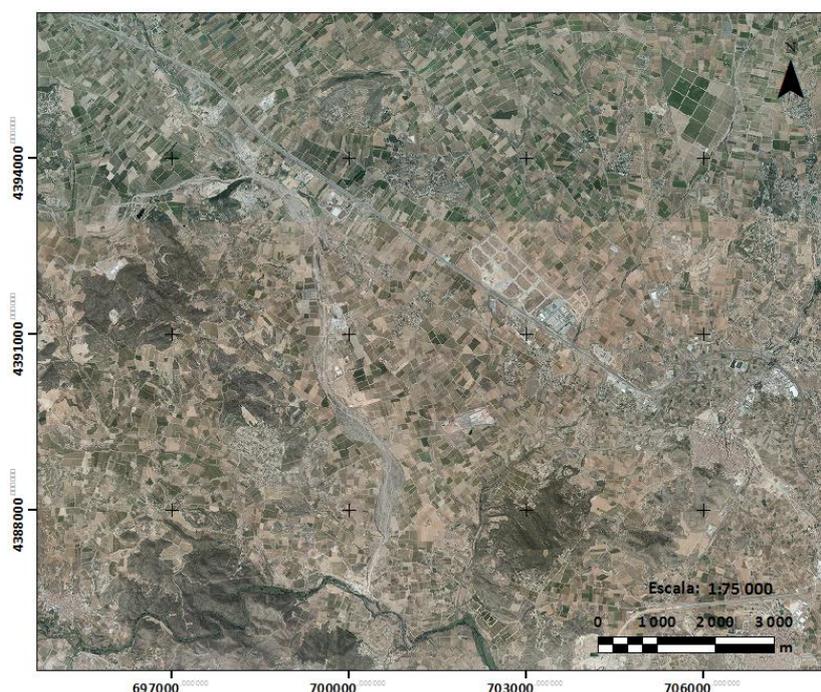


Ilustración 6: Ortofoto del PNOA para la zona de estudio, descargado desde el CNIG

### 3.3. Herramientas empleadas

- Agisoft PhotoScan Professional

Agisoft PhotoScan es un software de escritorio desarrollado para procesar imágenes digitales, mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por computador, con el objetivo final de generar una reconstrucción 3D a partir de dichas imágenes.

Existen dos versiones diferentes. La versión estándar está concebida para usuarios estándar que desean generar nubes de puntos a partir de múltiples imágenes. La versión profesional incluye funcionalidades específicas para la generación de productos más enfocados a determinadas ciencias de la geomática, donde se trabaja con productos georreferenciados y grandes extensiones. Esta edición permite obtener ortofotos georreferenciadas de alta resolución y

modelos digitales del terreno con densidad y precisión. Además, a los modelos tridimensionales generados, es posible añadirles textura fotográfica, generando así modelos foto-realísticos. Todos los procesos de georreferenciación se realizan utilizando sistemas de referencia cartográficos estándar. Por sus características, PhotoScan Profesional, es una herramienta adecuada para la documentación fotogramétrica de edificios, yacimientos y objetos arqueológicos, compitiendo y en ocasiones superando, en eficacia y calidad de resultados, a los sistemas LIDAR terrestres y aéreos. PhotoScan acepta los siguientes formatos de imagen: JPEG, TIFF, PNG, BMP, PPM, OpenEXR y JPEG Formato Multi-Picture (MPO).

- FUSION/LDV

El software FUSION/LDV fue desarrollado para el tratamiento de datos LIDAR, atendiendo a la necesidad de filtrado y tratamiento de dichos datos con el objetivo de ser introducidos sin problemas en entornos SIG, ya que los datos brutos no pueden ser tratados cómodamente en dichos softwares.

El sistema de análisis y visualización consta de dos programas principales, FUSION y 'Lidar Data Viewer' (LDV en adelante), y una colección de programas de línea de comandos para tareas específicas.

En la pantalla FUSION, se presentan los datos del proyecto en 2D, pudiendo añadir tanto imágenes como ficheros LIDAR, los cuales aparecerán representados por un cuadrado indicando la extensión geométrica de los mismos. de los sistemas de información geográfica. Es compatible con una gran variedad de tipos y formatos de datos incluyendo shapefiles, imágenes, modelos digitales del terreno, imágenes de modelos digitales de superficie y datos LIDAR.

Por su parte, LDV consiste en el entorno de visualización 3D para el examen y medición de subconjuntos de datos espacialmente explícitos.

Los Programas de línea de comandos proporcionan análisis específicos y capacidad de procesamiento de datos diseñados para el adecuado procesamiento en FUSION de adquisiciones masivas LIDAR. (*Manual de FUSION/LDV. Robert J. McGaughey. Mayo 2014*)

En resumen, éste conjunto de programas ofrece al usuario la posibilidad, no solo de visualizar datos tridimensionales, sino de poder tratar dichos datos, desde la eliminación de outliers, el recorte o unión de imágenes y múltiples funciones de tratamiento de datos 3D, hasta la creación de MDE y MDS a partir de nubes de puntos.

- ArcGIS

El software ArcGIS consiste en una serie de productos en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se trata de un software producido y distribuido por la empresa ESRI. Mediante los diferentes módulos de ArcGIS, se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

Los módulos de ArcGIS se agrupan según sus características, desde ArcGIS Desktop, en el que se engloban todas las herramientas de procesamiento de información geográfica en escritorio, hasta ArcGIS Online, donde se pueden generar tanto mapas como análisis sobre los mismos a través de internet.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. FASE 1. Proceso de Tratamiento de Datos Brutos

#### 4.1.1. Obtención de la realidad terreno o puntos de control

Las fotografías aéreas a tratar, como se ha explicado en el apartado 'Material utilizado', se trata de escaneados sin georreferenciar. A partir de estos datos, se puede obtener un Modelo Digital de Elevaciones con coordenadas locales, no obstante, es necesario que dicho MDE se encuentre en el mismo sistema de referencia que el MDE actual para la óptima comparación entre ambos modelos y el estudio de los cambios producidos por la riada.

Es especialmente importante saber la procedencia de los datos, los niveles de precisión, la de fiabilidad de éstos, los sistemas de referencia empleados, etc., ya que la validez de los análisis que posteriormente se hagan con esta información deberán analizarse teniendo en cuenta las características citadas.

Llegados a éste punto, es importante destacar que, en éste caso, no se disponen de datos acerca del sistema de referencia con el que fueron tomadas las imágenes, la procedencia de las mismas o los datos de calibración de la cámara con la que fueron tomadas. Todo ello, aumenta la dificultad y disminuye la precisión al realizar la georreferenciación de las imágenes. Este hecho muestra la necesidad de realizar una toma de puntos de control para poder obtener la realidad terreno, orientar las imágenes y, simultáneamente, georreferenciarlas.

- Selección de los puntos de apoyo.

El objetivo es la obtención de las coordenadas de un conjunto de puntos distribuidos en la zona de trabajo, denominados puntos de apoyo o puntos de control, sobre la zona cubierta por el vuelo fotogramétrico tal que permitan la determinación de la orientación absoluta del conjunto de fotogramas que componen dicho vuelo, así como el control de dicha orientación.

La distribución y número de puntos de apoyo es muy importante para realizar una correcta orientación de las imágenes. La localización de un punto de apoyo debe hacerse de modo que aparezca en el mayor número posible de fotogramas. Además, el conjunto de puntos de apoyo debe cubrir completamente la zona de trabajo no permitiendo extrapolaciones en la determinación de coordenadas dentro de dicha zona.

Geoméricamente, está demostrado que tres puntos bastan para determinar un plano, sin embargo, para trasladar la figura cuadrada de una foto aérea a su proyección plana correspondiente, se necesitan, al menos, cuatro puntos, los cuales deben estar situados, preferentemente, cerca de las esquinas. El número de puntos necesario para situar toda una pasada es inferior al producto de su número de fotos multiplicado por cuatro, ya que, en el caso de un recubrimiento longitudinal del 60%, permite que dos de los puntos elegidos puedan ser comunes a dos fotografías consecutivas, e incluso considerando el recubrimiento transversal (*Ilustración 7*).

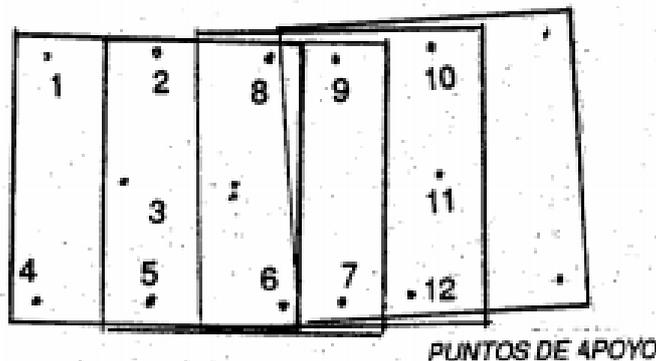


Ilustración 7: Distribución de puntos de control y recubrimiento.

Es decir, el valor del solape longitudinal debe ser como mínimo de un 60%. El valor del solape transversal debe presentar valores entre el 20% y el 40%, garantizando, en todo momento, la conexión entre pasadas. La zona de trabajo debe presentar un recubrimiento mínimo de seguridad en el recubrimiento estereoscópico tanto en la dirección de las pasadas como perpendicular a estas.

Con todo lo comentado, se han considerado los siguientes requisitos en la elección de los puntos de control:

- Los puntos deben estar repartidos por toda el área de la imagen que tenga solape con al menos una imagen, creando un recubrimiento longitudinal y transversal lo suficientemente densificado para obtener mejores resultados.
- Deben de localizarse puntos en áreas invariantes, es decir, en los lugares de la imagen que a día de hoy no hayan sido modificados y mantengan la misma geometría que en el año 1957. Por ello, se ha evitado la colocación de puntos en bordes de caminos ya que estos pueden haber sufrido ensanchamientos o haber sido asfaltados. De la misma manera, no se han localizado puntos en construcciones ya que estas pueden haberse reconstruido o, simplemente, la colocación del punto no se ha realizado en el borde correcto ya que pueden mostrarse sombras, según el ángulo de toma de la imagen.
- Los puntos se localizarán en lindes entre parcelas, procurando evitar los lindes con caminos o carreteras.
- Será preferible localizar puntos cercanos a la línea del barranco, generando una distribución longitudinal de puntos alrededor de éste. Éste paso es importante ya que se precisa la obtención de información del barranco que se formó con la riada.
- También es importante la distribución de puntos en zonas donde el terreno es accidentado, para realizar un buen despliegue espacial de puntos a diferentes cotas.

Con el empleo de dichos criterios, se procede a la digitalización de los puntos de control sobre la ortofoto del PNOA, utilizando el software 'ArcGIS', mediante el cual se obtendrá un fichero en formato shapefile que contendrá dichos puntos de control. A continuación, se detalla la obtención de las coordenadas planimétricas y altimétricas de dichos puntos.

- Cálculo de coordenadas cartesianas (X, Y, Z)

Como se acaba de comentar en el punto anterior, se ha obtenido una capa de puntos de control en formato shapefile, no obstante, los puntos obtenidos no contienen la coordenada altimétrica Z. Para la obtención de la misma, se ha empleado el MDE del vuelo LIDAR de 1 metro correspondiente a la zona de Lliria, donde están ubicadas las imágenes de estudio.

Con el objetivo de interpolar la coordenada altimétrica del MDE a los puntos, el primer paso ha sido transformar el modelo introducido en formato Ascii (.asc) a Ráster (.tif) mediante la herramienta del software ArcMap, "Ascii to Raster". Seguidamente, mediante la herramienta "Interpolate" o "Extract Multi Values to Points" se extrae la coordenada Z para cada uno de los puntos, a partir del MDE introducido.

Las coordenadas X e Y están ya implícitas, pero para hacerlas visibles en la tabla de atributos de la capa, se crean dos campos, uno para cada coordenada, de tipo Float, y se emplea la herramienta de ArcMap "Calculate Geometry" para asignar a dichos campos las coordenadas planimétricas correspondientes a cada punto.

Finalmente, la tabla de atributos ha sido exportada a un fichero de texto (.txt) y, tras ser modificado en Microsoft Excel para reconocer los datos numéricos que contiene, puede ser cargado en el software libre "Agisoft PhotoScan Professional" con el que se ha realizado la extracción de datos tridimensionales de las imágenes.

#### 4.1.2. Orientación de las imágenes y creación de la nube de puntos 3D

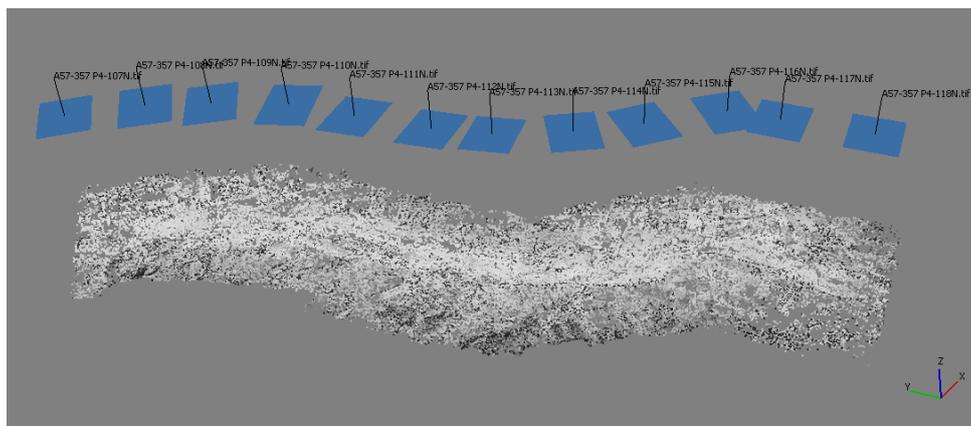
En general, el objetivo final del procesamiento de las imágenes en PhotoScan es construir un modelo 3D georreferenciado con textura. El procedimiento de procesamiento de fotografías comprende cuatro etapas principales: alineación de la cámara, creación de la nube de puntos densa, construcción de la malla y aplicación de textura. Estas etapas se explicarán detalladamente en los siguientes epígrafes.

Previamente, es importante especificar el sistema de referencia con el que se ha generado el proyecto, por eso seleccionamos el Sistema ETRS89 con coordenadas UTM en zona 30N, ya que los datos de partida y los puntos de control están en dicho sistema.

##### - Orientación de imágenes y Georreferenciación

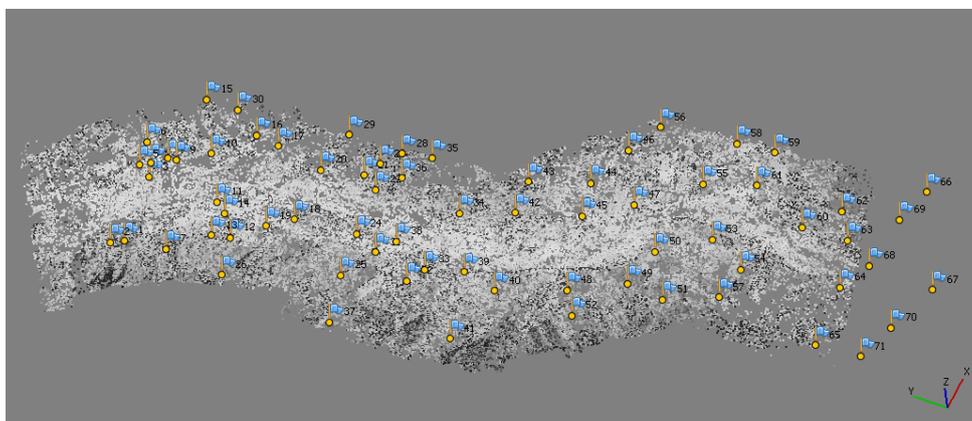
En esta etapa, PhotoScan busca los puntos de apoyo comunes en las fotografías y los compara, además, encuentra la posición de la cámara para cada imagen y ajusta los parámetros de calibración de la cámara. Como resultado se forma una nube de puntos dispersos y un conjunto de posiciones de cámara.

Al introducir en PhotoScan las imágenes del vuelo sin georreferenciar, el primer paso es el de generar una alineación de las cámaras (imágenes), que PhotoScan realiza de forma automatizada (*Ilustración 8*). No obstante, ésta alineación marca únicamente la orientación interna del modelo a generar, por ello se importa el fichero de texto de puntos de apoyo generado, para dar coordenadas a los puntos de las imágenes y así poder calcular la orientación externa del modelo tridimensional.



*Ilustración 8: Alineación automática de las fotografías*

Al localizar los puntos de apoyo en cada imagen y realizar el procesamiento de datos con PhotoScan se están utilizando técnicas de transformación de sistemas de coordenadas de las imágenes escaneadas como método de georreferenciación (*Ilustración 9*). En éste proceso participan dos sistemas de coordenadas; uno de ellos va a ser el sistema de referencia propio de la imagen, “sistema de referencia imagen” (fotografías escaneadas) ya que la imagen escaneada es un documento con un formato matricial o ráster. Internamente los píxeles de la imagen se localizan por medio de sus coordenadas en el “sistema de referencia imagen”. Dicho sistema, consiste en un conjunto de filas y columnas organizado de modo que la posición de cada píxel está determinada por la fila y columna que éste ocupa, situando el origen del mismo en la esquina superior izquierda; el otro es el sistema de referencia de los puntos de apoyo, “sistema de referencia terreno”.



*Ilustración 9: Situación de los puntos de control*

Así el proceso de georreferenciación consiste en establecer una correspondencia entre coordenadas imagen (fila columna) y coordenadas terreno. De modo que para cada par de coordenadas fila columna se obtienen unas coordenadas terreno aplicando la correspondencia o “Transformación” establecida.

Se pueden comprobar los resultados de la orientación externa ya que PhotoScan realiza un cálculo del error total cometido (*Ilustración 10*). De ésta forma se han ajustado o eliminado los puntos de apoyo que mostraban un error elevado y desfavorecían el procesamiento.

| Markers                                | Easting       | Northing       | Altitude   | Error (m)       | Projections | Error (pix)  |
|--|---------------|----------------|------------|-----------------|-------------|--------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> 60 | 700830.196500 | 4388017.519400 | 147.284600 | 2.878737        | 3           | 5.302        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 61 | 701079.125800 | 4388485.383000 | 152.533200 | 4.375331        | 3           | 3.287        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 62 | 701115.129000 | 4387755.449100 | 143.374800 | 2.791237        | 2           | 6.230        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 63 | 700854.381600 | 4387657.553100 | 141.347100 | 13.949785       | 2           | 0.232        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 64 | 700407.393700 | 4387583.019800 | 138.530200 | 6.218026        | 2           | 3.109        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 65 | 699834.688700 | 4387637.246200 | 143.185600 | 1.580163        | 2           | 1.773        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 66 | 701572.237300 | 4387143.056500 | 134.585100 | 3.551525        | 1           | 0.000        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 67 | 700678.314300 | 4386899.639400 | 129.580800 | 0.335912        | 1           | 0.000        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 68 | 700701.807600 | 4387418.592400 | 133.317500 | 7.455632        | 1           | 0.000        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 69 | 701213.354000 | 4387290.348600 | 138.467700 | 3.002086        | 1           | 0.000        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 70 | 700212.816900 | 4387127.045200 | 134.288000 | 1.332038        | 1           | 0.000        |
| <input checked="" type="checkbox"/> 71 | 699876.239800 | 4387286.351200 | 141.036400 | 2.462047        | 1           | 0.000        |
| <b>Total Error</b>                     |               |                |            | <b>4.403211</b> |             | <b>6.118</b> |

Ilustración 10: Resultados de la orientación externa previos a la eliminación de puntos con error elevado

### - Creación de la nube de puntos densa

La siguiente fase es la construcción de la nube de puntos densa. Sobre la base de las posiciones y las propias imágenes de la cámara, PhotoScan genera una nube de puntos densa, la cual puede ser editada y clasificada antes de la exportación o de proceder a la generación de modelos de malla 3D (Ilustración 11).

PhotoScan precisa de un procesamiento automático para la creación de la nube de puntos densa, donde los únicos parámetros a introducir son la precisión del procesamiento, el número máximo de puntos a generar y, en el caso de que se disponga de objetos enmascarados, si se quiere excluir partes de las imágenes que no se desean modelar. En éste caso se ha realizado siempre una nube de puntos a la más elevada precisión, con ningún número máximo de puntos a generar para que el programa sea libre de realizar los necesarios, y sin la utilización de objetos enmascarados.

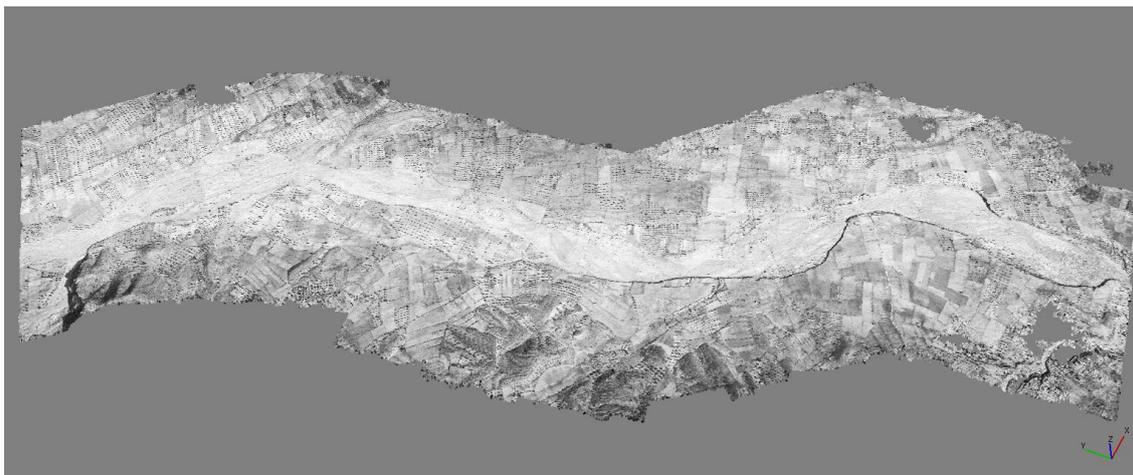


Ilustración 11: Resultado de la generación de la nube de puntos densa

### 4.1.3. Creación de la malla y textura

#### - Creación de la malla

La siguiente etapa es la construcción de la malla. PhotoScan genera una malla poligonal 3D que representa la superficie del objeto basado en la nube de puntos densa. La malla que se genera respeta la textura de la superficie.

Los parámetros a elegir en el proceso automatizado de la creación de la malla son el tipo de superficie, arbitraria, para el modelado de cualquier tipo de objeto cerrado, tal como una estatua o un edificio, o bajo relieve/terreno, para el modelado de superficies planas. También se puede elegir la fuente de datos, es decir, especificar si se quiere que se utilice para la generación de la malla la nube de puntos densa o la dispersa. En este proceso se ha escogido la fuente de la nube de puntos densa, que se traduce en un mayor tiempo de procesamiento, pero genera una salida de alta calidad. Por último, se ha de seleccionar el número de caras que se estime oportuno.

Existen tres formas diferentes de visualizar la malla generada: sombreado a color (*Ilustración 12*), sombreado monocromático (*Ilustración 13*) y malla de alambre (*Ilustración 14*).

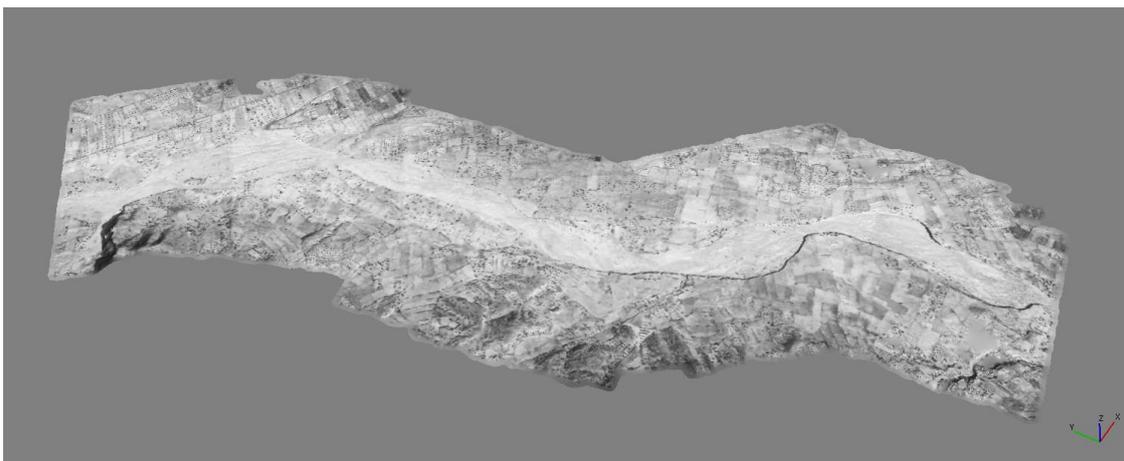


Ilustración 12: Modelo 3D visualizado mediante sombreado a color

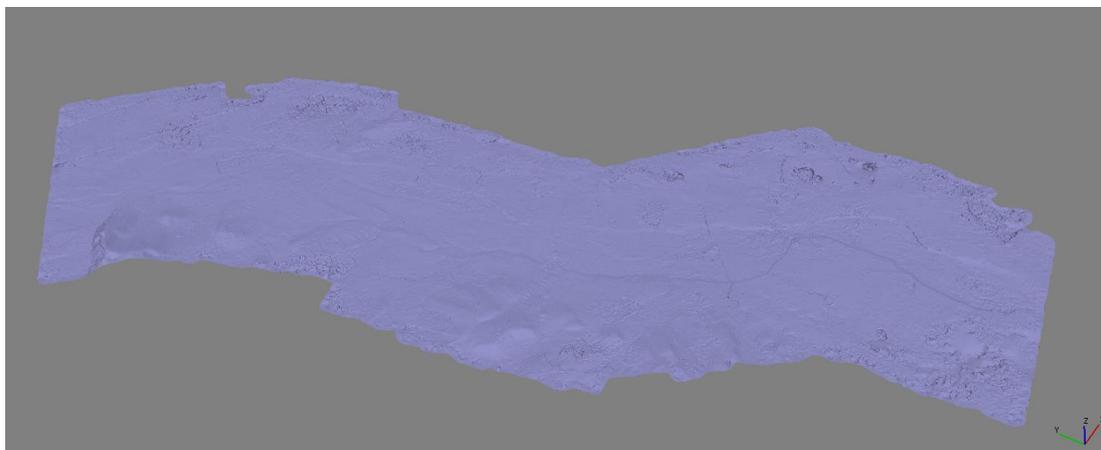


Ilustración 13: Modelo 3D visualizado mediante sombreado monocromático

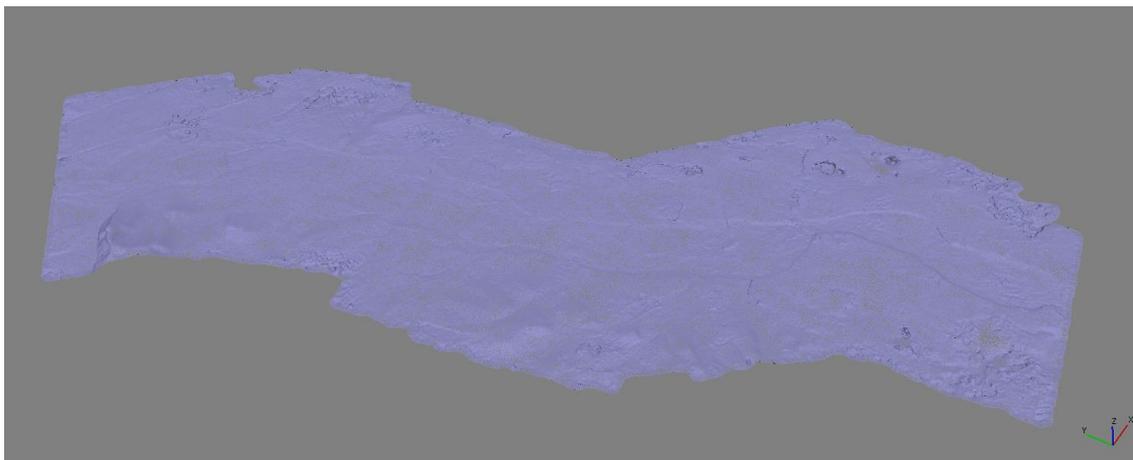


Ilustración 14: Modelo 3D visualizado mediante malla de alambre

Después de construir la malla, puede ser necesario editarla. Algunas correcciones como eliminación de los componentes separados, el cierre de los agujeros en la malla, etc., pueden ser realizadas por PhotoScan, sin embargo, para una edición más compleja es necesario efectuarla con un software de edición 3D externo. PhotoScan permite exportar la malla, editarla con otro programa e importar de nuevo.

#### - Aplicación de textura

Tras la creación de la malla, se reconstruye la geometría generando una textura. Para ello, desde la ventana de “Flujo de Trabajo” se selecciona la opción de texturizar.

El cuadro de diálogo “Crear textura” ofrece la posibilidad de escoger entre diferentes opciones. En “modo de maquetado” se puede elegir entre:

- Genérico: es el modo predeterminado, permite parametrizar mapas de textura de geometría arbitraria. El programa intenta crear una textura uniforme.
- Ortofoto: toda la superficie del objeto se textura en la proyección ortográfica; éste modo produce incluso representación de textura más compacto que el modo de Ortofoto adaptativa, la cual se define a continuación.
- Ortofoto adaptativa: el programa tiende a producir una representación de textura más compacta para las escenas casi planas, manteniendo una buena calidad de la textura de las superficies verticales, como las paredes de los edificios.
- Esférico: apropiado sólo para una determinada clase de objetos que tienen forma de bola.
- Cámara única: permite generar la textura de una sola imagen.
- Conservar mapa UV: se puede utilizar para reconstruir mapas de textura usando diferente resolución o para generar los mapas para el modelo parametrizado en un software externo.

También se puede seleccionar una de las siguientes opciones de modo de mezcla:

- Mosaico: esta opción ofrece mayor calidad para la ortofoto, ya que evita que se mezclen detalles de las imágenes superpuestas y emplea la foto más apropiada. Este modo es especialmente útil para la generación de ortofotos basado en el modelo geométrico aproximado.
- Promedio: por otro lado, mediante esta opción, PhotoScan utiliza el valor medio de todos los píxeles de las imágenes.
- Máxima intensidad: en éste caso, emplea para la texturización la imagen con máxima intensidad de píxel.
- Mínima intensidad: por su parte, mediante ésta opción, se emplea la imagen con intensidad mínima de píxel.

Los parámetros seleccionados han sido un modo de maquetado genérico y, para la opción de mezcla, se ha seleccionado Ortofoto puesto que es el procesamiento más rápido. Por último, en la opción “avanzado” se da la posibilidad de activar la casilla “permitir la corrección de color” (Ilustración 15). Esta función es útil para el procesamiento de conjuntos de datos con la variación de brillo extremo, aunque hay que tener en cuenta que el proceso de corrección de color toma mucho tiempo.

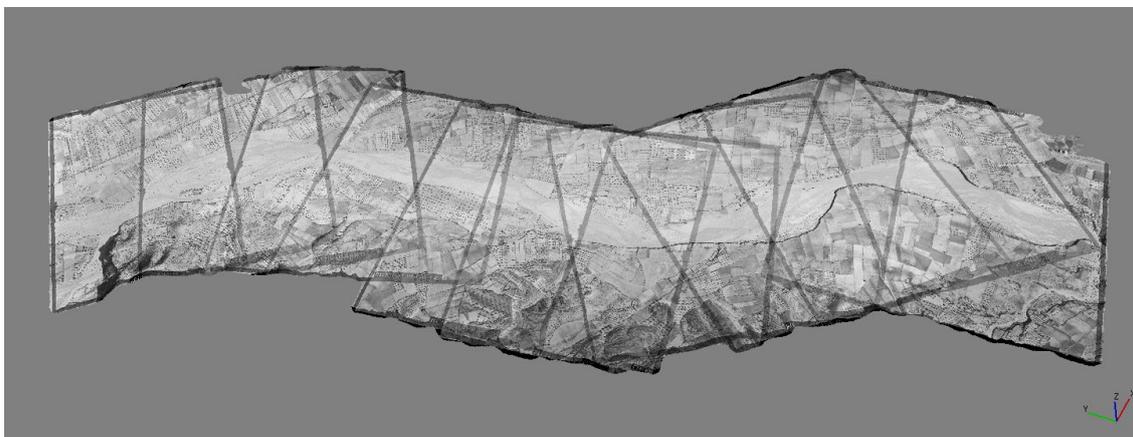


Ilustración 15: Modelo con textura en opción de mezcla ortofoto

#### 4.1.4. Exportación de datos

Con PhotoScan se pueden exportar los resultados de procesamiento en diversas representaciones: puntos dispersos, nube de puntos densa, calibración de la cámara, datos de orientación de la cámara, malla, ortofotos del modelo, etc.

Los datos de calibración de la cámara se pueden exportar justo después de que se complete la alineación de las fotografías. El resto de las opciones de exportación están disponibles al completar la construcción del modelo 3D.

Finalmente, pueden exportarse los siguientes tipos de ficheros a partir de los resultados obtenidos.

- Exportación del fichero DEM: la información obtenida es la de un modelo digital de elevaciones, es decir, información topográfica que muestra la rugosidad del terreno y densidad del muestreo, a través de una serie de métodos tales como el tamaño exacto de los píxeles y su resolución, utilización de algoritmos de interpolación, inclusión de la resolución vertical, e implementación de algoritmos que permite el análisis del terreno a representar. PhotoScan permite la exportación del fichero en formato Tiff.
- Exportación de Ortofotos: permite la exportación de ortofotografías en los formatos más comunes de fotografías (.jpeg, .png, .tif). En el cuadro de diálogo que muestra ésta opción hay que especificar el plano de proyección que se pretende exportar y su ángulo de rotación.
- Exportación del modelo 3D: se puede exportar el modelo tridimensional generado en formatos planos como Adobe PDF (.pdf), en U3D models (.u3D) para poder introducir el modelo en un archivo pdf y en Wavefront OBJ (.obj) para posteriormente subir el modelo a la red o simplemente para ser directamente impreso pasando por un software tridimensional como Cura 3D Printing Slicing Software.
- Exportación de la nube de puntos: se extrae a partir de la opción de extracción de puntos. La nube de puntos, al ser un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional, tiene múltiples aplicaciones si se extrae el conjunto directamente en formatos, como ofrece PhotoScan, como el de Wavefront OBJ o U3D, o también en fichero de texto, Adobe PDF o en formato LAS (.las) donde la nube puede continuar siendo tratada con otros softwares.

El objetivo final del proyecto es obtener un MDE con la mejor resolución posible. Por lo tanto, se ha extraído el proyecto como nube de puntos densa, en formato LAS, para que pueda continuar siendo tratada en otros softwares de tratamiento de datos espaciales como es el software FUSION, mediante el cual se puede realizar un correcto filtrado de los datos.

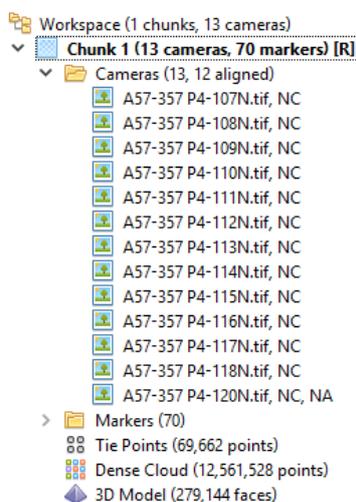


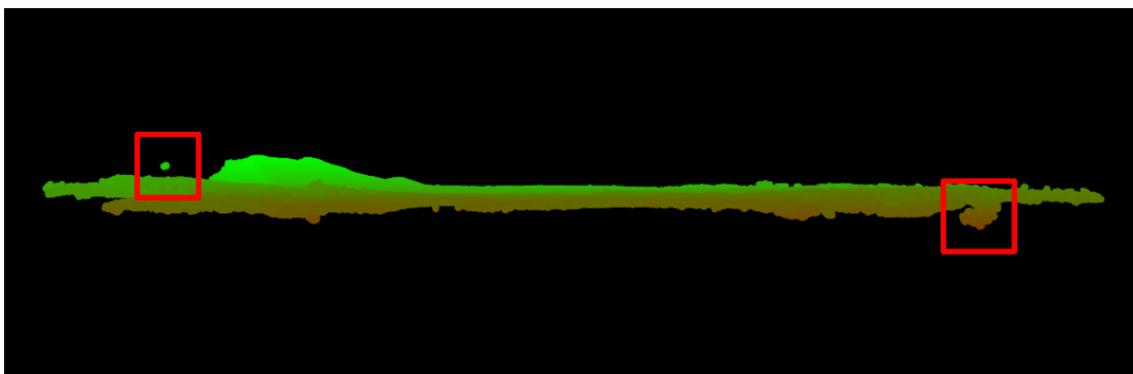
Ilustración 16: Espacio de trabajo en PhotoScan

## 4.2. FASE 2. Tratamiento de datos espaciales

La nube de puntos densa obtenida mediante PhotoScan contiene diversos errores, por lo que resulta necesario realizar un filtrado previo, el cual se llevará a cabo mediante el software FUSION, como se explica a continuación. Éste tratamiento consiste, en primer lugar, en la eliminación de los datos atípicos (outliers), es decir, los puntos de la nube que muestran una diferencia significativa en cuanto a su posición con el resto de puntos, y que directamente se puede comprobar cómo están fuera de la distribución de puntos que genera el modelo buscado. Tras esto, se han empleado los puntos del modelo para la creación, por una parte, del modelo digital de superficies (MDS) y, por otra parte, del modelo digital de elevaciones (MDE). Finalmente, para poder estudiar los modelos generados y poder compararlos con el actual en un software de sistema de información geográfica, deben transformarse a un formato que permita su visualización en dicho programa.

### 4.2.1. Eliminación de outliers

Al introducir la nube de puntos en el software FUSION, éste permite la visualización tridimensional de la nube mediante el ejecutable PDQ.exe de FUSION (*Ilustración 17*), donde se pueden apreciar claramente los datos atípicos que se encuentran fuera del modelo (*Ilustración 17, recuadros rojos*).



*Ilustración 17: Visualización de la nube de puntos 3D mediante PDQ e identificación de outliers*

Dicho ejecutable permite un rápido reconocimiento del modelo y, por lo tanto, una rápida visualización de outliers, en el caso de que los hubiese. PDQ también permite conocer la coordenada altimétrica de los puntos, así que, visualizando los puntos atípicos que contiene el modelo, se ha comprobado como el punto más elevado muestra una cota Z de 345.770 metros, y el punto siguiente a éste en cuanto a cota Z es de 233.95 metros. Esto muestra un ejemplo claro de cómo el punto mencionado en primer lugar puede tratarse de un outlier.

Por ello, se toma la decisión de emplear, en primer lugar, comandos de eliminación de datos atípicos. Para ello, se emplean dos comandos diferentes.

- Filter Data

El algoritmo FilterData, aplica diversos filtros a los datos de entrada, produciendo nuevos ficheros que solamente contendrán los datos que superen los requisitos del filtro. La aplicación más usual del algoritmo consiste en la eliminación de “outliers”. Otras opciones del filtro

superponen los datos de entrada con una malla especificada por el usuario, produciendo una salida que contiene solamente los valores de elevación máximos o mínimos para cada una de las celdas.

La sintaxis del comando solicita:

- **FilterType:** algoritmo de filtrado utilizado para eliminar retornos del archivo de datos. Contempla tres opciones: **Outlier**, que elimina los retornos por encima o por debajo de la elevación media más o menos la desviación estándar de las elevaciones; **Mínimo**, elimina todos los retornos excepto el resultado con la elevación mínima; **Máximo**, elimina todos los retornos excepto el resultado con la elevación máxima.
- **FilterParams:** parámetros específicos para el método de filtrado. Para la elección de eliminar por el método de **Outlier**, aquí es donde se debe indicar el multiplicador aplicado a la desviación estándar. Para **Mínimo** y **Máximo**, éste parámetro se ignora, pero se debe de introducir un valor nulo en su lugar, tal como 0.
- **WindowSize:** indicar el tamaño de la ventana usada para calcular la desviación estándar de elevaciones o el mínimo / máximo resultado.
- **OutputFile:** nombre del archivo de salida.
- **InputFile:** nombre del archivo de entrada a tratar.

Dicho esto, la sentencia empleada se procesa mediante la herramienta con los parámetros de **Outlier**, puesto que lo que interesa es la eliminación de éstos, con un multiplicador de 0.5, el cual es bastante acusado, y una ventana de 10. También se ha indicado el directorio de trabajo para la obtención del fichero de entrada y el directorio de guardado del fichero de salida. La sentencia, en concreto, es la siguiente:

```
C:\FUSION\FilterData outlier 0.5 10  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \Filter_Puntos31.las  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \puntos3.las
```

Una vez aplicada la herramienta **FilterData**, se pretende comprobar si en los resultados obtenidos se han eliminado todos los outliers. Para ello, se visualiza dicho resultado mediante la herramienta **LDV**, donde se puede comprobar que los valores de cota máxima y mínima, corresponden a 328.20 y 80.90 metros, respectivamente (*Ilustración 18*).

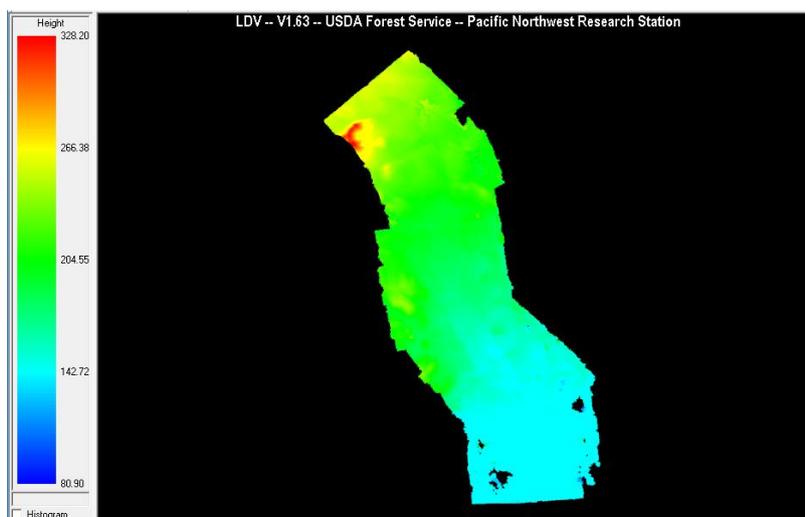


Ilustración 18: Nube de puntos tras aplicar el algoritmo FilterData

Con el objetivo de evaluar si dichos resultados siguen conteniendo valores atípicos, se comparan los valores máximo y mínimo con sus homólogos en el MDE LIDAR actual con resolución de 1 metro, donde las cotas máxima y mínima, corresponden a los valores 329.732 y 119.570 metros, respectivamente. Dichos valores distan de los obtenidos tras la aplicación de la herramienta FilterData, lo cual significa que el resultado sigue estando afectado por valores atípicos.

Seguidamente, se ha escogido el criterio de establecer un umbral de error a partir de los valores máximo y mínimo del MDE LIDAR actual, utilizando dicho umbral para la aplicación de la herramienta ClipData, la cual se procede a detallar a continuación.

- Clip Data

La herramienta ClipData crea submuestras de datos LIDAR para diversas tareas de análisis. La sentencia ClipData genera un recorte altimétrico por encima y por debajo del modelo que se busca conseguir, es decir, marca un umbral el cual mantiene y elimina los datos fuera de dicho umbral, definido según los criterios explicados en el punto anterior.

La sintaxis del comando solicita:

- Zmin: incluye puntos por encima de la elevación Z indicada. Debe usarse con /dtm para incluir puntos por encima de la altitud Z.
- Zmax: incluye puntos por debajo de la elevación Z indicada. Debe usarse con /dtm para incluir puntos por debajo de la altitud Z.
- InputFile: nombre del archivo de entrada a tratar.
- OutputFile: nombre del archivo de salida.
- MinX MinY: esquina inferior izquierda del cuadro delimitador del área de muestra.
- MaxX MaxY: esquina superior derecha del cuadro delimitador del área de muestra.

Tras comprobar la sintaxis se ha generado la propia sentencia a emplear con la nube de puntos, utilizando como parámetros, una Z mínima de 115 metros, dejando un margen de error de 4 metros con el modelo actual, ya que, en los años transcurridos desde la toma de imágenes hasta la época actual, la orografía del terreno puede haber cambiado considerablemente. Al coincidir el resultado generado mediante la sentencia FilterData, en cuanto a coordenada Z máxima de la nube de puntos, y su correspondencia con el valor actual, se ha dejado como valor de Zmax 333 metros, para tener un pequeño margen por el redondeo de coordenadas. De todas formas, al estar éste valor por encima del punto máximo, la sentencia seleccionada no efectúa ningún cambio altimétrico en los puntos más elevados de la nube de puntos.

Por otro lado, el fichero de entrada puede ser el generado tras la sentencia FilterData, ya que la eliminación de datos que procesa la sentencia ClipData, con los parámetros seleccionados, resultada más agresiva que el resultado de la sentencia anterior; por otra parte, el fichero de entrada puede ser directamente la nube de puntos sin filtrar. Finalmente, la herramienta ClipData solicita la introducción de las coordenadas de las esquinas inferior izquierda (X mín., Y mín.) y superior derecha (X máx., Y máx.) para establecer los límites de aplicación del filtrado, de ésta forma, dicho filtro de recorte podría aplicarse únicamente a un área en concreto. La obtención de las coordenadas límite de la nube de puntos se realiza mediante la herramienta 'Examine LAS files headers' (*Ilustración 19*).

| LAS summary information  |                                  |
|--------------------------|----------------------------------|
| File creation date:      | Julian day: 132 Year: 2016       |
| Header size:             | 227                              |
| Offset to data:          | 397                              |
| Variable length records: | 2                                |
| Data record format:      | 2                                |
| Data record length:      | 26                               |
| Number of points:        | 11520750                         |
| Return 1 points:         | 11520750                         |
| Return 2 points:         | 0                                |
| Return 3 points:         | 0                                |
| Return 4 points:         | 0                                |
| Return 5 points:         | 0                                |
| X scale factor:          | 0.100000                         |
| Y scale factor:          | 0.100000                         |
| Z scale factor:          | 0.100000                         |
| X offset:                | 697563.812770                    |
| Y offset:                | 4387420.344053                   |
| Z offset:                | 0.000000                         |
| X range:                 | 697563.812770 to 701588.412770   |
| Y range:                 | 4387420.344053 to 4394825.744053 |
| Z range:                 | 80.900000 to 328.200000          |

*Ilustración 19: Datos de la cabecera del archivo de la nube de puntos 3D*

Por lo tanto, la sentencia procesada finalmente es la siguiente:

```
C:\FUSION\ClipData /zmin:115 /zmax:333
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \puntos3.las
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \Clip_Puntos31.las
697563.812770 4387420.344053 701588.412770 4394825.744053
```

El resultado del procesamiento de dicha sentencia es una nube de puntos corregida de datos atípicos (*Ilustración 20*). A partir de aquí, el proyecto se bifurca en dos caminos, creación del modelo digital de superficies (MDS) y creación del modelo digital de elevaciones (MDE). A continuación, se detallan ambos modelos, comenzando por el MDS.

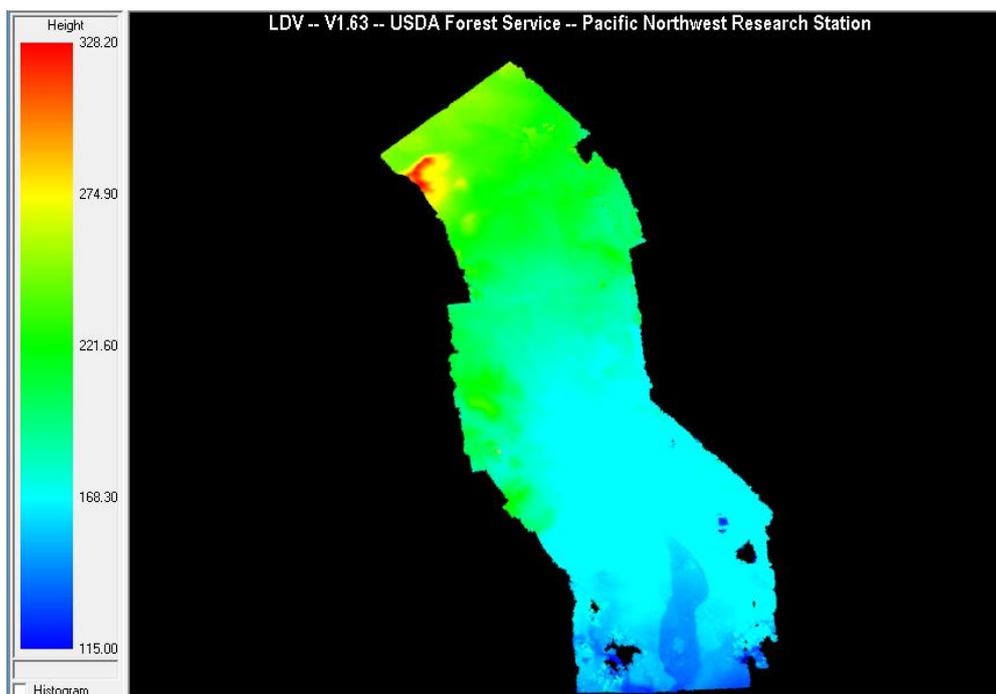


Ilustración 20: Nube de puntos tras aplicar el filtrado mediante el algoritmo ClipData

#### 4.2.2. Creación del MDS

- Canopy Model

CanopyModel crea un modelo de superficie de cobertura usando una nube de puntos LIDAR. Por defecto, el algoritmo usado por CanopyModel asigna la elevación del retorno más alto dentro de cada celda de la cuadrícula al centro de la celda de la misma. CanopyModel suaviza la superficie generada usando un filtro de mediana o de media, o ambos. CanopyModel proporciona opciones para calcular una textura métrica (coeficiente de variación de valores de superficie dentro de una ventana  $n \times n$ ), pendiente, o aspecto para el modelo de cobertura y los muestra en la superficie final. Cuando se usa con un modelo bare-earth, CanopyModel resta las elevaciones del suelo de las elevaciones de los retornos para producir el modelo de altura de cobertura. La salida de CanopyModel es un archivo en formato PLANS DTM que usa valores de elevación de coma flotante y contiene información de proyección con coordenadas. (*Manual de FUSION/LDV. Robert J. McGaughey. Mayo 2014*)

La sintaxis del comando solicita:

- SurfaceFile: Nombre del archivo de salida de superficie de cobertura (almacenado en formato PLANS DTM con extensión \*.dtm).
- Cellsize: tamaño de celda elegido en las mismas unidades que los datos LIDAR.
- xyunits: unidades para los datos LIDAR X e Y: para metros (M) y para pies (F).
- Zunits: unidades para los datos de elevación LIDAR: para metros (M) y para pies (F).

- Coordsys: sistema de coordenadas para el modelo de cobertura: para desconocido (0), para UTM (1) y para 'state plane' (2).
- Zone: zona del sistema de coordenadas para el modelo de cobertura (0 para desconocido).
- Horizdatum: datum horizontal para el modelo de cobertura: 0 para desconocido, 1 para NAD27 y 2 para NAD83.
- Vertdatum: datum vertical para el modelo de cobertura: 0 para desconocido, 1 para NGVD29, 2 para NAVD88 y 3 para GRS80.
- DataFile: fichero de entrada de datos LIDAR en formatos LDA, LAS, ASCII, LIDARDAT.

Los parámetros seleccionados han sido un tamaño de píxel de 1 metro, como la resolución del MDE actual descargado, unidades de las coordenadas planimétricas y altimétricas en metros (M), UTM para el sistema de coordenadas, 30 para indicar la zona a la que corresponde, es decir, el huso 30, y la indicación de que el datum horizontal y vertical es desconocido. El fichero de entrada, es decir, la nube de puntos filtrada, tiene la extensión LAS y el fichero de salida es de extensión DTM (*Ilustración 21*). Así se muestra la sentencia procesada:

```
C:\FUSION\CanopyModel  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \canopy.dtm 1 M M 1 30 0 0  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION\Clip_puntos31.las
```



*Ilustración 21: Modelo Digital de Superficies tras aplicar el algoritmo CanopyModel*

La sentencia generada necesita el fichero de salida en formato DTM, pero un SIG no acepta ficheros con extensión DTM, por dicha razón se precisa la transformación del MDS.dtm generado a un fichero ráster de extensión ASCII para poder ser comparado en un SIG con modelos en formato ráster actuales.

- DTM2ASCII

DTM2ASC convierte los datos almacenados en el formato PLANS DTM en archivos raster ASCII. Estos archivos se pueden importar en el software SIG como ArcInfo. El resultado generado tras emplear la sentencia DTM2ASCII proporciona la misma funcionalidad que el fichero generado previamente.

La sintaxis solicita únicamente el fichero de entrada y el fichero de salida a generar, como se observa a continuación:

```
C:\FUSION\DTM2ASCII  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION\canopy.dtm  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION\MDS.asc
```

Tras generar el modelo digital de cobertura y transformarlo a formato ráster, el siguiente paso es realizar el mismo proceso, pero para crear el modelo de elevaciones, con las sentencias que le corresponden.

#### 4.2.3. Creación del MDE

- Ground Filter

GroundFilter está diseñado para filtrar una nube de retornos LIDAR, para identificar aquellos resultados que yacen en la superficie de terreno probable. GroundFilter no produce un perfecto conjunto de resultados en la superficie del terreno probable porque no elimina completamente los rendimientos de grandes superficies relativamente planas y de elevadas superficies tales como techos de edificios. Con el resultado tras la aplicación de éste comando algunos datos, como datos de vegetación, son eliminadas con los coeficientes apropiados por la función peso y suficientes iteraciones. Experimentos realizados para estudiar el empleo de GroundFilter han demostrado que los coeficientes por defecto de la función peso producen buenos resultados en altas densidades de nubes de puntos (> 4 resultados/metro cuadrado). El programa puede ser usado con baja densidad de nube de puntos, pero algún experimento podría ser necesario para seleccionar coeficientes apropiados. En general, GroundFilter produce conjuntos de puntos que dan resultado en modelos superficiales que son adecuados para calcular alturas de vegetación. El conjunto de puntos y los modelos resueltos podrían no ser adecuados cuando la superficie tierra-descubierta es el producto primario. (*Manual de FUSION/LDV. Robert J. McGaughey. Mayo 2014*)

Los parámetros que precisa dicha sentencia son los siguientes:

- gparam: valor para el parámetro g de la ecuación de peso. El valor predeterminado para el parámetro g es -2.0
- wparam: valor para el parámetro w de la ecuación de peso. El valor predeterminado es 2.5.
- iteraciones: número de repeticiones para la lógica de filtrado (el número por defecto es de 5).

- OutPut: fichero de salida en formato LAS.
- InputFile: fichero de entrada en formato LAS.

Con los parámetros explicados y, partiendo del archivo de la nube de puntos filtrada mediante ClipData, se han procesado las siguientes sentencias con un número total de 8 iteraciones por sentencia y los datos para los conmutadores explicados que se muestran a continuación:

```
C:\FUSION\GroundFilter /gparam:1.5 /wparam:3 /iterations:8  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground1.las 100  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \Clip_Puntos31.las
```

```
C:\FUSION\GroundFilter /gparam:0.1 /wparam:0.75 /iterations:8  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground2.las 32  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground1.las
```

```
C:\FUSION\GroundFilter /gparam:0 /wparam:0.5 /iterations:8  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground3.las 7  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground2.las
```

```
C:\FUSION\GroundFilter /gparam:0 /wparam:0.2 /iterations:8  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground4.las 4  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \ground3.las
```

La salida de GroundFilter es un archivo que contiene solamente los puntos clasificados como resultados de suelo guardados en formato LDA. Para poder generar el modelo de elevaciones del terreno se debe emplear la herramienta GridSurfaceCreate.

- Grid Surface Create

GridSurfaceCreate crea un modelo cuadrulado de superficie usando colecciones de puntos aleatorios, en concreto, una superficie que representa la elevación media de todos los puntos dentro de una celda, por lo que la superficie final que produce se extiende dentro del conjunto de puntos superficie del terreno probable. El modelo superficial es guardado en formato PLANS DTM usando valores de puntos flotantes de elevación.

La sintaxis requerida para la creación del modelo medio de elevaciones es la siguiente:

- Output: fichero de salida en formato DTM.
- Cellsize: tamaño de celda elegido en las mismas unidades que los datos LIDAR.
- xyunits: unidades para los datos LIDAR X e Y: para metros (M) y para pies (F).
- Zunits: unidades para los datos de elevación LIDAR: para metros (M) y para pies (F).
- Coordsys: sistema de coordenadas para el modelo de cobertura: para desconocido (0), para UTM (1) y para 'state plane' (2).

- Zone: zona del sistema de coordenadas para el modelo de cobertura (0 para desconocido).
- Horizdatum: datum horizontal para el modelo de cobertura: 0 para desconocido, 1 para NAD27 y 2 para NAD83.
- Vertdatum: datum vertical para el modelo de cobertura: 0 para desconocido, 1 para NGVD29, 2 para NAVD88 y 3 para GRS80.
- DataFile: fichero de entrada de datos LIDAR en formatos LDA, LAS, ASCII, LIDARDAT.

Los parámetros seleccionados han sido un tamaño de píxel de 1 metro para poder ser comparado con el MDE actual descargado, unidades de las coordenadas planimétricas y altimétricas en metros (M), UTM para el sistema de coordenadas, 30 para indicar la zona a la que corresponde, es decir, el huso 30, y la indicación de que el datum horizontal y vertical es desconocido. El fichero de entrada, es decir, el último fichero de salida tras generar el GroundFilter, tiene la extensión LAS y el fichero de salida es de extensión DTM (*Ilustración 22*). Así se muestra la sentencia procesada:

```
C:\FUSION\GridSurfaceCreate  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION\grid.dtm 1 M M 1 30 0 0  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION\ground4.las
```

Como último paso se debe repetir la transformación del fichero de extensión DTM recién generado a un fichero de mismas características, pero con extensión ASCII para poder trabajar y comparar los ficheros ráster generados. Para ello, se repite la sentencia DTM2ASCII con los siguientes ficheros de entrada y salida:

```
C:\FUSION\DTM2ASCII  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \grid.dtm  
H:\Proyecto1957\Valencia_1957_ordenado\Prueba4\FUSION \MDE31.as
```



*Ilustración 22: Modelo Digital de Elevaciones tras aplicar el algoritmo GridSurfaceCreate*

## 5. ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS RESULTADOS Y ESTUDIOS REALIZADOS

### 5.1. Análisis crítico de la nube de puntos

Previamente a la obtención de resultados finales, resulta necesaria la evaluación de los resultados obtenidos para aportar fiabilidad y consistencia a los mismos. Por ello, no solamente se han evaluado las diferencias entre los modelos obtenidos a partir de las fotografías y el MDE actual, sino que, además, se ha realizado un análisis previo a la obtención de los mismos mucho más detallado, en el que se demuestra que los resultados finales son los más aceptables.

El análisis previo comentado anteriormente, consiste en una evaluación de las diferencias entre la nube de puntos obtenida mediante PhotoScan, filtrada utilizando FUSION y sin filtrar, con las cotas correspondientes a dichos puntos en el MDE actual, analizando así la mejora tras el filtrado.

#### 5.1.1. Análisis de la nube de puntos sin filtrar

A continuación, como se ha comentado en la introducción de éste epígrafe, se redacta el proceso de transformación de la información contenida en la nube de puntos 3D para su análisis, comentando las distintas herramientas empleadas, su definición de empleo y datos introducidos en ellas mediante el software ArcGis.

- Create LAS dataset

Crea un dataset de LAS que hace referencia a uno o más archivos de LAS y superficies opcionales de entidades de restricción, para así poder relacionar las herramientas de análisis con la nube de puntos 3D. Cada archivo LAS contiene normalmente en el encabezado información de referencia espacial que lee el dataset LAS. Si esta información falta o no está bien definida, el archivo LAS no se colocará en su ubicación correcta.

La entrada o input para la herramienta es el archivo LAS de la nube de puntos y la salida es el nombre y ubicación para la creación del Dataset LAS (.lasd). La referencia espacial del Dataset es el Sistema de coordenadas de la nube de puntos, es decir, el de todo el proyecto de estudio. Tras esto, se crea el Dataset LAS que puede visualizarse haciendo zoom sobre el proyecto.

- LAS to Multipoints

Herramienta de análisis 3D que crea entidades multipunto que utilizan uno o más archivos LIDAR y guarda los datos de la tabla de atributos del archivo de entrada, copiando éstos a la nueva capa en formato shapefile del tipo punto creada.

El archivo de entrada es el Dataset LAS (.lasd) recién creado y la salida es la capa de puntos con la información del archivo LAS (.shp). La distancia 2D promedio entre puntos, '*Average Point Spacing*', puede ser una aproximación, expresando el valor en las unidades de proyección del sistema de coordenadas de salida, por ello, se ha indicado aproximadamente que sea de 0.001 metros, ya que la nube de puntos generada es elevadamente densa. Se debe de indicar también

el Sistema de coordenadas de referencia y el factor Z, que se utiliza para convertir las unidades lineales Z para que coincidan con las unidades lineales X, Y. El valor predeterminado es 1, que no altera los valores de elevación. Con éstos datos, se procesa para obtener la capa de puntos en formato shapefile de la nube de puntos 3D.

- Multipart to Singlepart

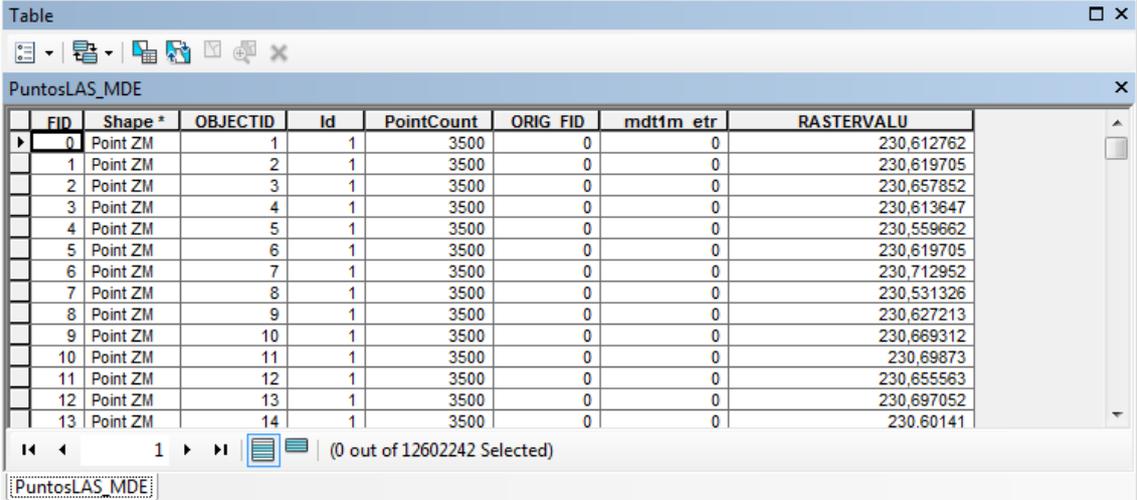
Crea una clase de entidad que contiene entidades de parte simple generadas al separar entidades multiparte de entrada, es decir, todos los atributos que de entrada se consideraban como uno sólo, aun siendo geoméricamente individuales entre sí, se transforman a datos independientes entre sí. En el proceso se crea un campo en la tabla de atributos, llamado 'ORIG\_FID', que establece los identificadores de la entidad de entrada.

El archivo de entrada puede ser de cualquier tipo de entidad, en éste caso el archivo de multipuntos en formato shapefile que se ha creado en el punto previo, y el archivo de salida contiene las entidades de parte simple individual de las entidades de entrada.

- Extract Values to Points

Ésta herramienta de análisis espacial extrae valores de celda en ubicaciones específicas en una clase de entidad de punto desde uno o más rásteres, el cual en éste caso se emplea el MDE del LIDAR de 1 metro descargado, y registra los valores en la tabla de atributos de la clase de entidad de punto. Así se obtiene la cota actual que corresponde a la posición de cada punto de la nube de puntos tridimensional.

El resultado es un nuevo archivo de puntos (*PuntosLAS\_MDE.shp*) que, como se observa en su tabla de atributos, tiene un campo llamado 'RASTERVALU' con la cota extraída del LIDAR de 1 metro en la posición de esos puntos (*Ilustración 23*).



| FID | Shape *  | OBJECTID | Id | PointCount | ORIG FID | mdt1m_etr | RASTERVALU |
|-----|----------|----------|----|------------|----------|-----------|------------|
| 0   | Point ZM | 1        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,612762 |
| 1   | Point ZM | 2        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,619705 |
| 2   | Point ZM | 3        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,657852 |
| 3   | Point ZM | 4        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,613647 |
| 4   | Point ZM | 5        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,559662 |
| 5   | Point ZM | 6        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,619705 |
| 6   | Point ZM | 7        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,712952 |
| 7   | Point ZM | 8        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,531326 |
| 8   | Point ZM | 9        | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,627213 |
| 9   | Point ZM | 10       | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,669312 |
| 10  | Point ZM | 11       | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,69873  |
| 11  | Point ZM | 12       | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,655563 |
| 12  | Point ZM | 13       | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,697052 |
| 13  | Point ZM | 14       | 1  | 3500       | 0        | 0         | 230,60141  |

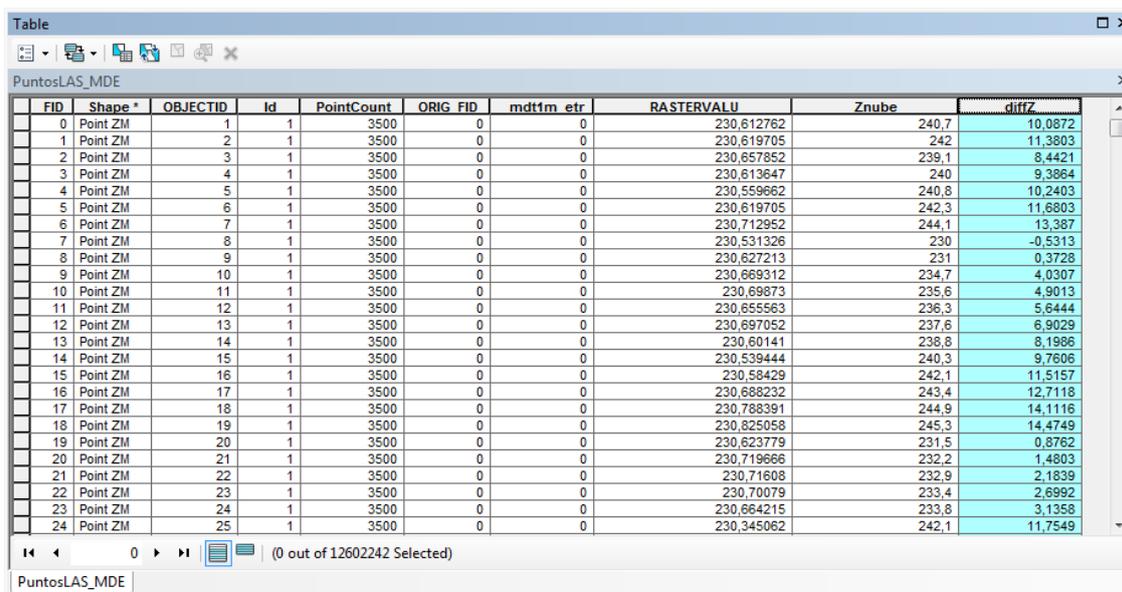
Ilustración 23: Fragmento de la tabla de atributos con los valores del MDE actual extraídos

#### 5.1.1.1. Diferencia numérica entre la nube de puntos y el modelo actual

Una vez se obtiene la cota Z para los puntos de la nube tridimensional en la actualidad, sólo resta calcular la cota Z de esos puntos en relación con la nube de puntos 3D, para poder comparar ambas coordenadas de cada punto y obtener las diferencias de cota que ha habido desde 1957 a 2009.

El primer paso es el de crear un nuevo campo en la misma tabla de atributos, con las mismas características que el resto de campos de la tabla donde, mediante el uso de 'Calculate Geometry', se obtiene la coordenada Z de los puntos de la nube 3D generada.

Tras esto, se repite el mismo proceso de creación de un nuevo campo en la tabla donde, mediante la herramienta 'Field Calculator', se almacena la diferencia de cota Z entre la nube generada con las imágenes aéreas de 1957 y la cota Z del MDE actual (Ilustración 24), obteniendo datos referentes al cambio en la orografía del terreno tras el desastre producido y el paso de los años.



| FID | Shape *  | OBJECTID | Id | PointCount | ORIG_FID | mdtfm | etr | RASTERVALU | Znube | diffZ   |
|-----|----------|----------|----|------------|----------|-------|-----|------------|-------|---------|
| 0   | Point ZM | 1        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,612762 | 240,7 | 10,0872 |
| 1   | Point ZM | 2        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,619705 | 242   | 11,3803 |
| 2   | Point ZM | 3        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,657852 | 239,1 | 8,4421  |
| 3   | Point ZM | 4        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,613647 | 240   | 9,3864  |
| 4   | Point ZM | 5        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,559662 | 240,8 | 10,2403 |
| 5   | Point ZM | 6        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,619705 | 242,3 | 11,6803 |
| 6   | Point ZM | 7        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,712952 | 244,1 | 13,387  |
| 7   | Point ZM | 8        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,531326 | 230   | -0,5313 |
| 8   | Point ZM | 9        | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,627213 | 231   | 0,3728  |
| 9   | Point ZM | 10       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,669312 | 234,7 | 4,0307  |
| 10  | Point ZM | 11       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,69873  | 235,6 | 4,9013  |
| 11  | Point ZM | 12       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,655563 | 236,3 | 5,6444  |
| 12  | Point ZM | 13       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,697052 | 237,6 | 6,9029  |
| 13  | Point ZM | 14       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,60141  | 238,8 | 8,1986  |
| 14  | Point ZM | 15       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,539444 | 240,3 | 9,7606  |
| 15  | Point ZM | 16       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,58429  | 242,1 | 11,5157 |
| 16  | Point ZM | 17       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,688232 | 243,4 | 12,7118 |
| 17  | Point ZM | 18       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,788391 | 244,9 | 14,1116 |
| 18  | Point ZM | 19       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,825058 | 245,3 | 14,4749 |
| 19  | Point ZM | 20       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,623779 | 231,5 | 0,8762  |
| 20  | Point ZM | 21       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,719666 | 232,2 | 1,4803  |
| 21  | Point ZM | 22       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,71608  | 232,9 | 2,1839  |
| 22  | Point ZM | 23       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,70079  | 233,4 | 2,6992  |
| 23  | Point ZM | 24       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,664215 | 233,8 | 3,1358  |
| 24  | Point ZM | 25       | 1  | 3500       | 0        | 0     | 0   | 230,345062 | 242,1 | 11,7549 |

Ilustración 24: Fragmento del campo de diferencia entre MDEs

Al haber realizado la resta entre los valores numéricos de la nube de puntos generada menos el modelo actual, los resultados positivos muestran que las cotas altimétricas de la nube de puntos se encontraban por encima del terreno actual. Por el contrario, los valores negativos son referidos a áreas donde el modelo actual es más elevado altimétricamente. Los resultados obtenidos deben de ser corroborados observando las imágenes del vuelo aéreo y la ortofoto del PNOA actual. Si los datos no son coherentes con la visualización de las imágenes, esto puede ser debido a un error de procesamiento.

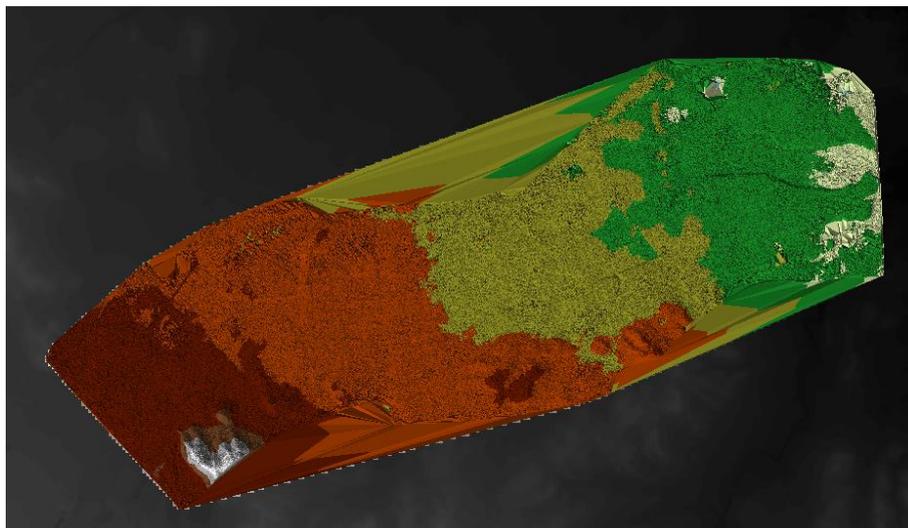
#### 5.1.1.2. Diferencia gráfica entre la nube de puntos generada y el modelo actual

Con el objetivo de comparar los resultados filtrados con sus homólogos sin filtrar, se procede, en primer lugar, a la transformación de la nube de puntos sin filtrar a formato raster, ya que el resultado filtrado se obtiene directamente en dicho formato mediante FUSION.

- Create TIN

Para ello, en primer lugar, se obtiene un TIN a partir de la nube de puntos mediante la herramienta 'Create TIN' de ArcGIS (*Ilustración 25*). Esta herramienta permite la creación de una malla de triángulos irregulares a partir de la nube de puntos, utilizando el criterio del vecino más próximo. El tipo de entidad de superficie define la forma en que las entidades de entrada influirán en la definición de la superficie triangulada.

- Las entidades de punto se pueden especificar como masa de puntos, los cuales proporcionan los nodos cuyos valores Z se utilizarán en la triangulación de la superficie.
- Las entidades de línea se pueden especificar como líneas suaves o de rotura, en función de la utilidad de las mismas. En caso de tratarse de continuidades lineales utilizadas para el suavizado (curvas de nivel), se utilizarán como líneas suaves. En caso contrario, al tratarse de líneas utilizadas para interrumpir la continuidad de la superficie (líneas hidrográficas), será conveniente la utilización de las mismas como líneas de rotura.
- Las entidades poligonales pueden especificarse como entidades de recorte que definirán el área de los datos, reemplazando las entidades que definen las regiones con valores Z constantes (masas de agua), creando así superficies planas no afectadas por la triangulación.



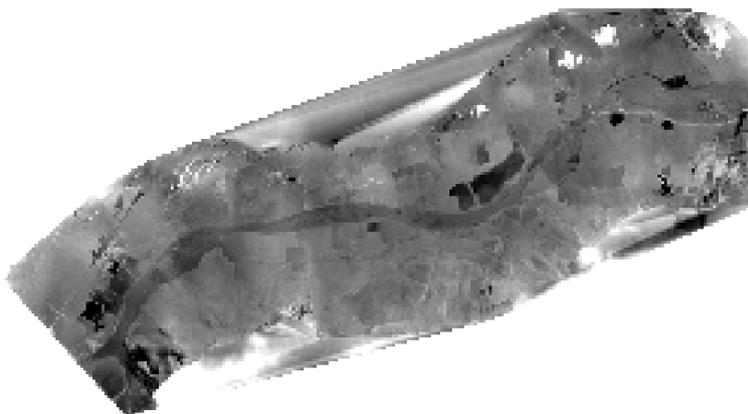
*Ilustración 25: TIN Generado a partir de la nube de puntos mediante ArcGIS*

- TIN to Raster

Seguidamente, se utiliza la herramienta 'TIN to Raster' de ArcGIS para convertir el TIN obtenido anteriormente a formato Raster, pudiendo así compararlo con el MDE obtenido en FUSION a partir de la nube de datos filtrada.

- Raster Calculator

Finalmente, se realiza la comparativa entre ambos modelos, restando ambos mediante la herramienta 'Raster Calculator' de ArcGIS (*Ilustración 26*).

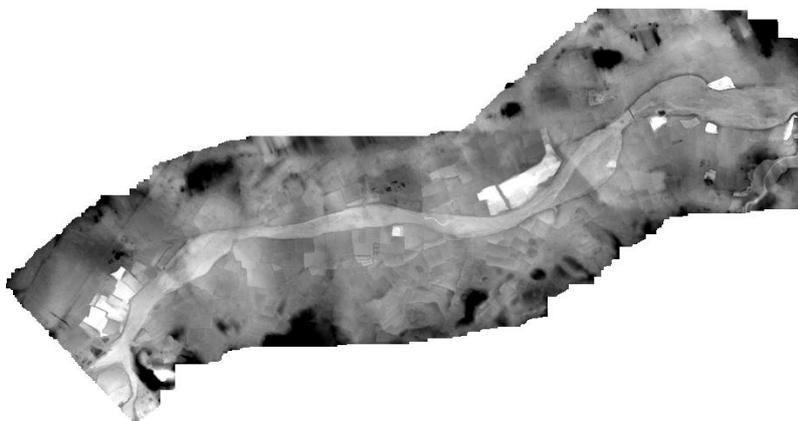


*Ilustración 26: Resultado de la diferencia entre el modelo sin filtrar y el modelo actual*

Las diferencias entre ambos modelos pueden llegar a ser bastante considerables, esto es debido a que, en primer lugar, el modelo generado no ha sido filtrado de valores atípicos y, en segundo lugar, el TIN genera triángulos planos en los laterales del modelo, ya que no acepta geometrías irregulares.

#### 5.1.2. Análisis crítico de la nube de puntos filtrada

Seguidamente, utilizando el MDE obtenido mediante FUSION tras aplicar el filtrado de outliers correspondiente, se procede a comparar el mismo con el MDE actual. Para ello, se realiza la diferencia entre ambos mediante la herramienta 'Raster Calculator' (Ilustración 27).



*Ilustración 27: Resultado de la diferencia entre el modelo filtrado y el modelo actual*

Puede comprobarse como el resultado obtenido mejora considerablemente, a simple vista, frente a la comparativa realizada en el epígrafe anterior. A continuación, se presenta un análisis más detallado de ambas comparativas mostrando sus estadísticas.

#### 5.1.3. Comparativa de estadísticas

Finalmente, además de los resultados gráficos de ambas comparativas, se procede a realizar un análisis comparando los estadísticos básicos de ambos resultados, pudiendo cuantificar así la mejora obtenida tras aplicar el filtrado (Tablas 1 y 2). Para la obtención de dichos estadísticos, se utiliza la herramienta 'Calculate Statistics' de ArcGIS.

| MODELO SIN FILTRAR [m] |         |
|------------------------|---------|
| Mín.                   | 94.946  |
| Máx.                   | 327.638 |
| Media                  | 188.332 |
| Desv. Típica           | 31.116  |

Tabla 1: Estadísticas del modelo sin filtrar

| MODELO FILTRADO [m] |         |
|---------------------|---------|
| Mín.                | 125     |
| Máx.                | 307.2   |
| Media               | 187.029 |
| Desv. Típica        | 30.823  |

Tabla 2: Estadísticas del modelo filtrado

Tras comprobar las estadísticas generadas, se aprecia una sustancial mejora en los valores máximo y mínimo, que se aproximan mucho más al modelo actual. El cambio ha sido notable ya que, tanto el mínimo como el máximo han variado más de 20 metros.

Por otro lado, la diferencia obtenida en los valores de media y desviación típica no es prácticamente apreciable, ya que, en ninguno de los dos casos, es superior al metro.

#### 5.1.4. Resultado del modelo procesado con la nube de puntos filtrada

Una vez generado el Modelo Digital de Elevaciones mediante PhotoScan, se observa la aparición de determinadas líneas o barreras en el modelo, coincidentes con el borde de las fotografías (*Ilustración 28, recuadros rojos*). Dichas franjas no aparecen en el modelo en la posición de todos los bordes de las fotografías sino, solamente, en algunos de ellos.

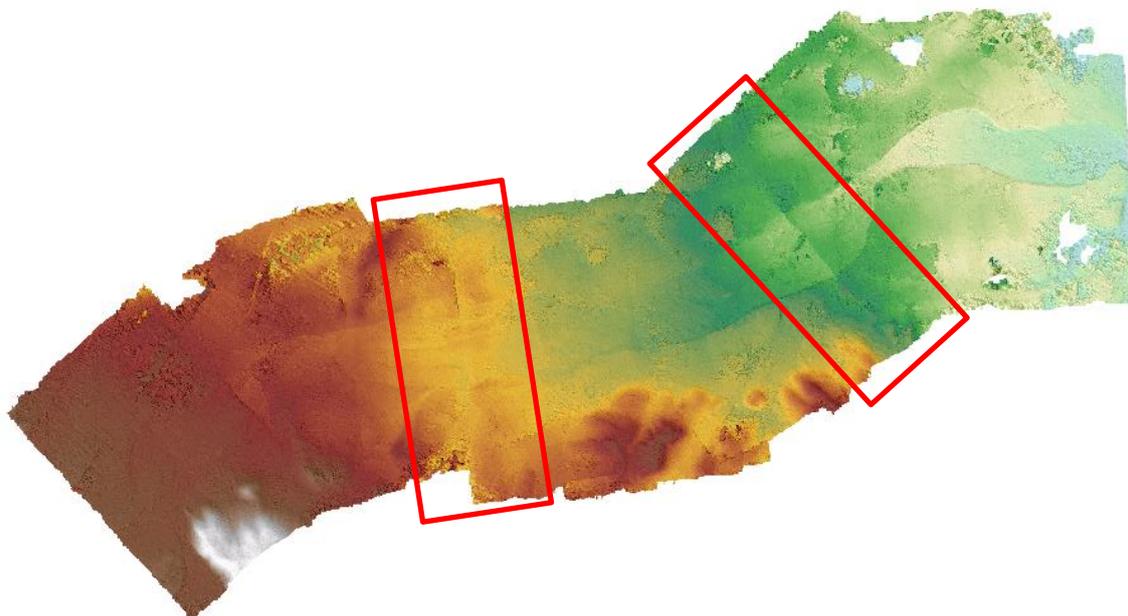


Ilustración 28: MDS con sombreado donde se aprecian las bandas (recuadros rojos)

Dichas franjas son consideradas un error serio, puesto que alteran los resultados considerablemente, modificando la cota del modelo en dichas zonas y, por lo tanto, generando resultados erróneos y confusos ante estudios geomorfológicos del barranco, como, por ejemplo, cambios volumétricos o mapas de pendientes.

Se desconoce la causa exacta de la aparición de dichas franjas, no obstante, se exponen a continuación las posibles causas de la aparición de las líneas.

- Error de alabeo en la toma de la foto
- Retoque previo de las fotografías, es decir, modificación geométrica de las mismas.
- Mal estado de conservación de las fotografías o incorrecto escaneado de las mismas, provocando alteraciones radiométricas en las imágenes, lo que genera una falsa ilusión de diferencia de altura de vuelo.

En cuanto al error de alabeo, este se puede observar claramente en la alineación de PhotoScan, donde se determinan las posiciones de las cámaras (*Ilustración 29*). Por otro lado, el resto de posibles causas, son fáciles de comprobar al visualizar las diferentes fotografías.

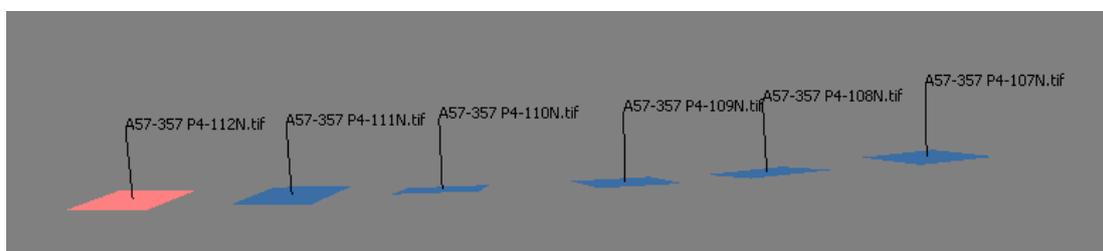


Ilustración 29: Error de alabeo en la orientación de las cámaras

## 5.2. Análisis crítico del MDE/MDS obtenido

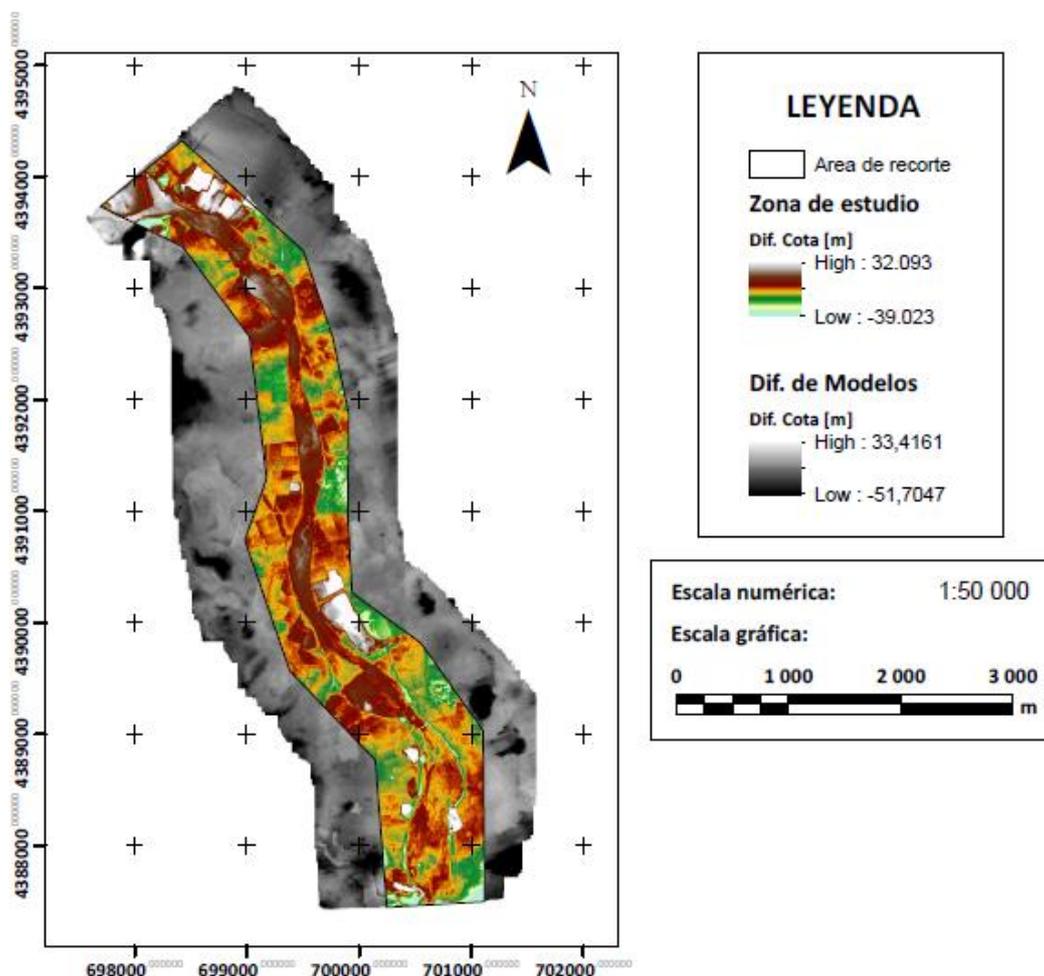
Tras las conclusiones del epígrafe anterior, se parte de la conclusión de que el MDE/MDS generado, tras tratarse de outliers en FUSION y siguiendo la metodología redactada, es la solución más aceptable obtenida. Por ello, a continuación, se redactan los estudios analíticos realizados, donde se comparan resultados métricos para intentar aportar información acerca del cambio producido en éstos casi 60 años, a nivel tanto orográfico con geomorfológico, y se definen los límites de estudio generados.

### 5.2.1. Delimitación de la zona de estudio

Como se comentó en el epígrafe '3.1. Serie de Fotografías', las imágenes de estudio muestran, desde un primer punto, serias restricciones que dificultan las decisiones metodológicas y, en consecuencia, limitan la calidad del resultado. Así que, se debe de buscar la mejor solución que reduzca la posibilidad de cometer un error evidente.

Como se ha comentado, las imágenes fueron tomadas sin un sistema inercial con el que obtener las correcciones longitudinales y transversales, por ello, las fotografías muestran una distorsión radial que se agranda en los bordes de las mismas y que provoca que la única zona en la que se pueden obtener resultados fiables sea la central. Ésta misma afirmación se respalda con los resultados obtenidos entre la resta de modelos, donde se puede comprobar que la diferencia de valores más extrema tiende a encontrarse hacia los márgenes de las imágenes y, por supuesto, en la zona del barranco, puesto que éste mostraba en 1957 su mayor crecida. Por ello mismo, se ha decidido acotar la zona de resultados fiables del modelo de diferencias entre 1957 y 2009, manteniendo la zona central que también es la de más interés en éste estudio.

Para realizar dicha acotación se ha empleado la herramienta 'Clip' de ArcGIS, la cual recorta una parte de un dataset ráster, mosaico o una capa de servicio de imágenes, introduciéndole otro ráster o una capa en general que trabaje de plantilla para la zona de recorte. La salida del recorte incluye todos los píxeles que intersectan la extensión de la plantilla (*Ilustración 30*).



*Ilustración 30: Acotación de la zona de estudio*

Como se puede comprobar, la zona sombreada en tonos de gris es la zona eliminada y, a partir de ahora, los análisis de solución se realizarán sobre la zona en escala de colores.

Pero no únicamente era necesario realizar un recorte del área inicial, sino que también, los valores registrados dentro del emplazamiento del barranco son de gran importancia para caracterizarlo en ciertos puntos de estudio, fuera del trabajo a nivel completo del área de las imágenes. Esto es así ya que en ciertos análisis es preferible dejar a un lado el área del barranco y en otros únicamente obtener resultados de dicha área, como se muestra en la explicación de cada análisis, posteriormente. Por ello, también ha sido necesario extraer el emplazamiento del barranco a un nuevo ráster, creando para ello una capa shapefile de tipo polígono donde, de la misma forma que el caso anterior, se ha delimitado la zona del barranco dejando un pequeño margen longitudinal a lo largo de éste. El recorte también se ha realizado mediante la herramienta 'Clip Data' (*Ilustración 31*).

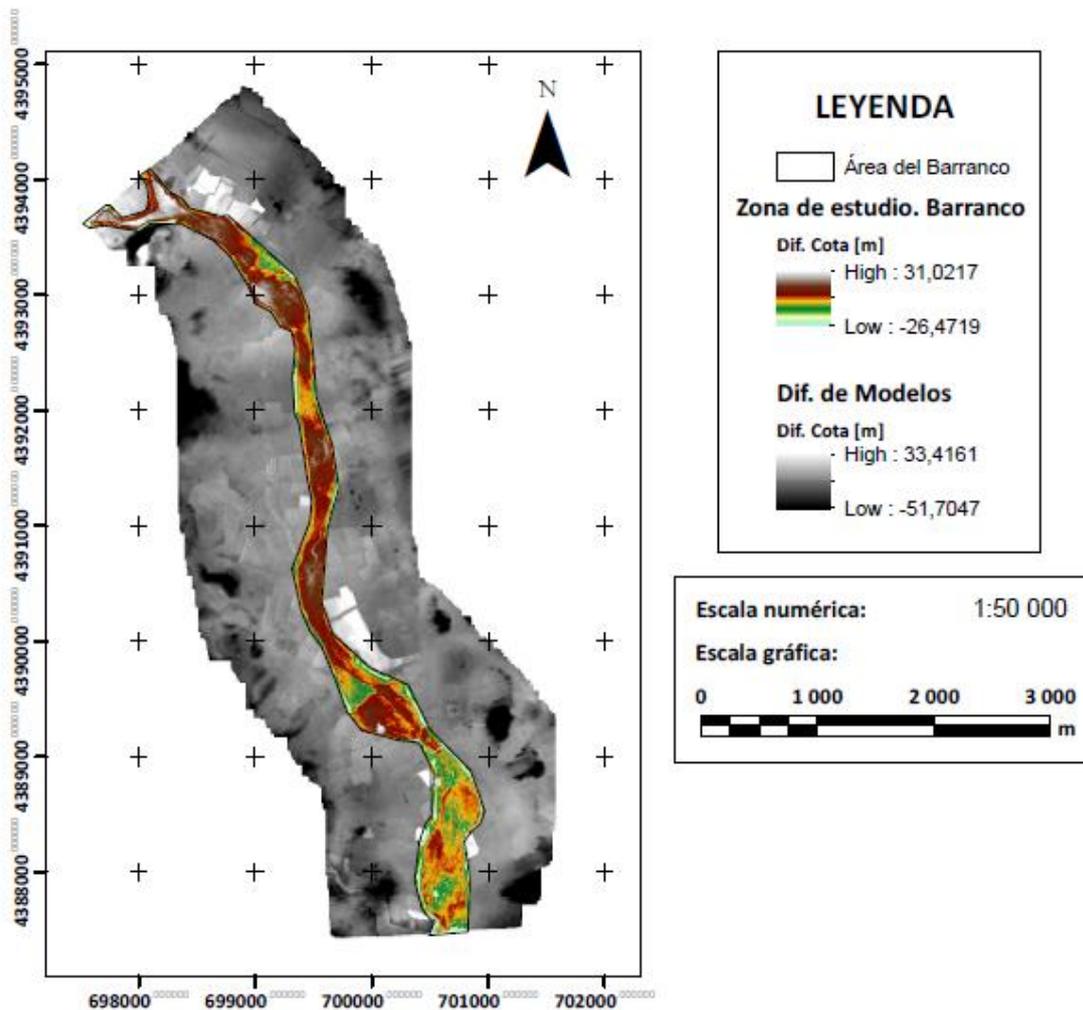


Ilustración 31: Acotación de la zona del barranco

En la visualización previa se observa como el resultado muestra una capa ráster en graduación de color del emplazamiento del barranco para estudios posteriores y, bajo ésta, se encuentra la capa ráster del área completa de la diferencia de modelos, que no se volverá a emplear por las justificaciones explicadas en la instrucción de éste capítulo.

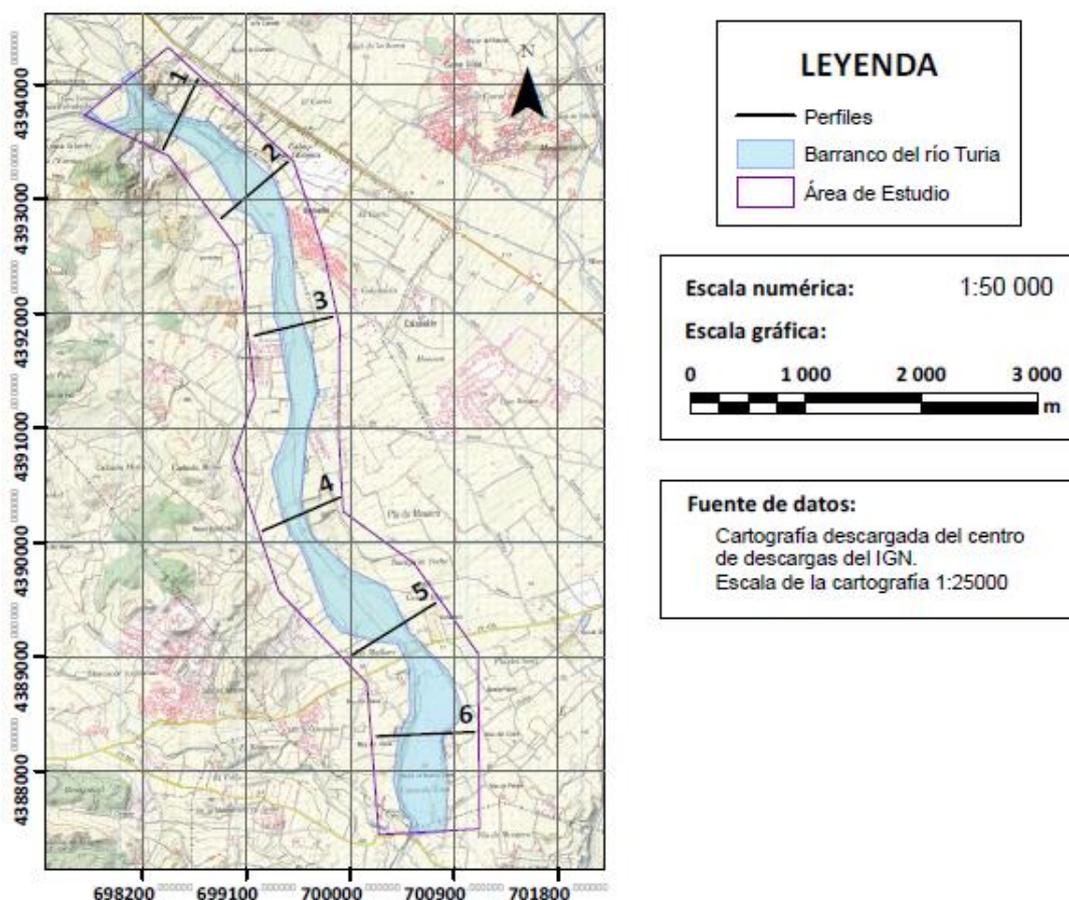
### 5.2.2. Generación de perfiles transversales

Para el estudio de cambio en el área de estudio, entre el modelo generado de 1957 y el modelo del 2009, como primer estudio, se procede a generar un total de 6 perfiles transversales al barranco, distribuidos proporcionalmente por dicha área, para poder tener una idea de los cambios producidos.

Llegados a éste momento es necesario esclarecer que, a partir de éste punto, los estudios comparativos se realizan empleando el MDS y no el MDE generado, puesto que, en los posteriores estudios, la importancia se centra en extraer información principalmente del área del barranco. Tras haber tratado la nube de puntos de outliers, para la obtención del modelo de elevaciones se ha empleado la herramienta del software FUSION, 'Ground Filter'. Al aplicar ésta herramienta en modelos con relieve orográfico pronunciado, en éste caso referido al barranco del río Turia, es posible que en algunos lugares haya generado huecos inesperados. Por esta

razón se emplea el modelo de superficies, para evitar que se puedan generar errores sistemáticos, creados por el software, sin ningún criterio. De todas formas, el empleo del MDS no produce una diferencia representativa al comparar dicho modelo con el MDE, puesto que, en la zona de estudio, en el año 1957, se puede observar como no existían áreas urbanas o edificios aislados de altura destacable que pudiesen influenciar en los análisis.

Con todo esto, en el siguiente esquema se puede localizar la distribución de dichos perfiles transversales (*Ilustración 32*).



*Ilustración 32: Localización de los diferentes perfiles transversales a lo largo de la zona de estudio*

A continuación, se muestran los histogramas generados para cada perfil, donde se puede ver gráfica y numéricamente el cambio orográfico existente en casi los 60 años que hay de diferencia. En dichos perfiles, se esclarece la localización del barranco mediante un recuadro negro, diferenciándolo así de las zonas colindantes que pueden dar lugar a confusión.

En el primer histograma (*Gráfico 1*), puede observarse cómo las zonas donde se han construido canteras pueden generar confusión, ya que su forma se asemeja a la de la cuenca de un río. En cuanto a la diferencia que interesa para este estudio, se observa cómo la cuenca del río cuenta con una diferencia de unos 7 metros entre el modelo de 1957 y el actual, representando así la cantidad de agua y sedimentos que recogía la cuenca en dicho instante.

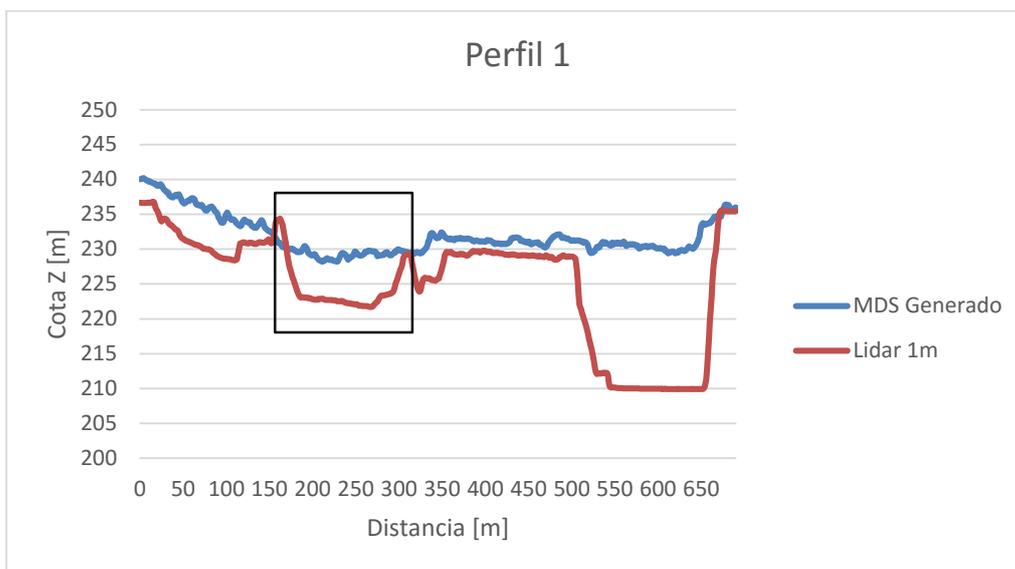


Gráfico 1: Perfil 1 sobre el barranco y las zonas colindantes

El segundo perfil (*Gráfico 2*), presenta un caso distinto, en el que el modelo actual se encuentra más elevado, siendo la causa de esto la aparición de una zona urbana. En cuanto al barranco, se observa la misma diferencia de, aproximadamente, 7 metros que en el caso anterior. No obstante, en este caso, se observa cómo la cuenca es considerablemente mas amplia.

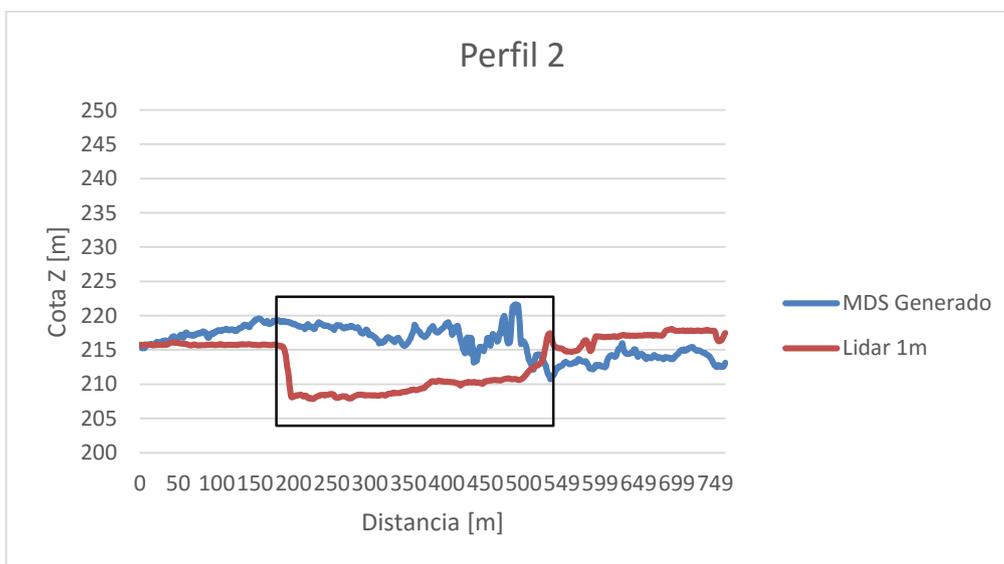


Gráfico 2: Perfil 2 sobre el barranco y las zonas colindantes

Seguidamente, en el perfil 3 (*Gráfico 3*), se observa una clara delimitación de la cuenca. Como curiosidad, se aprecian las barreras artificiales creadas para evitar la entrada del agua del río en los cultivos y como, en 1957, se vieron rebasadas e inundadas por completo.

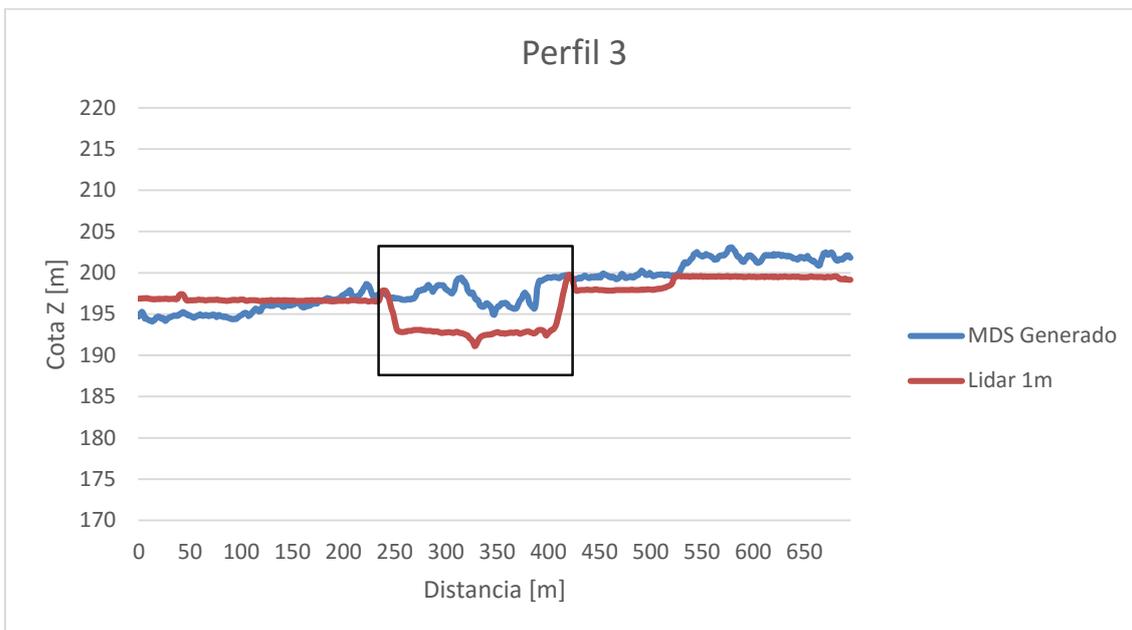


Gráfico 3: Perfil 3 sobre el barranco y las zonas colindantes

En cuanto al perfil 4 (Gráfico 4), este presenta el mismo resultado confuso que el primer perfil, donde se aprecia la construcción de una cantera en la actualidad. Por otro lado, la cuenca cuenta, en este caso, con una diferencia de cota de, aproximadamente, 5 metros.

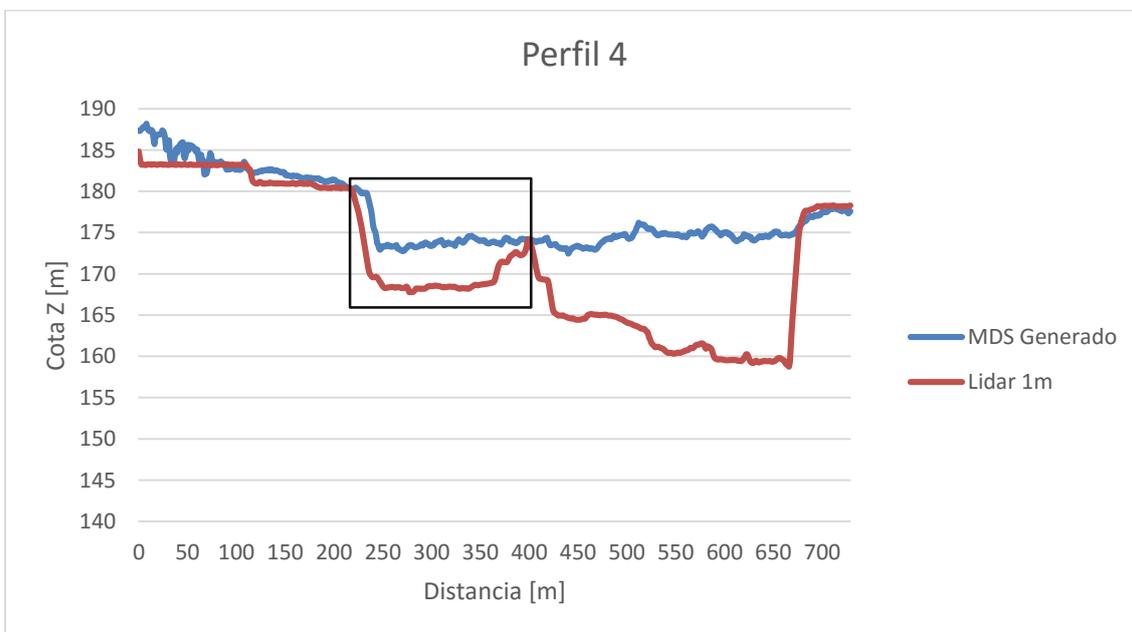


Gráfico 4: Perfil 4 sobre el barranco y las zonas colindantes

Por otro lado, el perfil 5 (Gráfico 5), presenta una pequeña zona sobre elevada en el modelo de 1957. Tras comprobar las fotografías se concluye que dicha elevación es provocada por un error radiométrico en las imágenes. Sin embargo, en la zona correspondiente al barranco, si se aprecia correctamente la crecida del río.

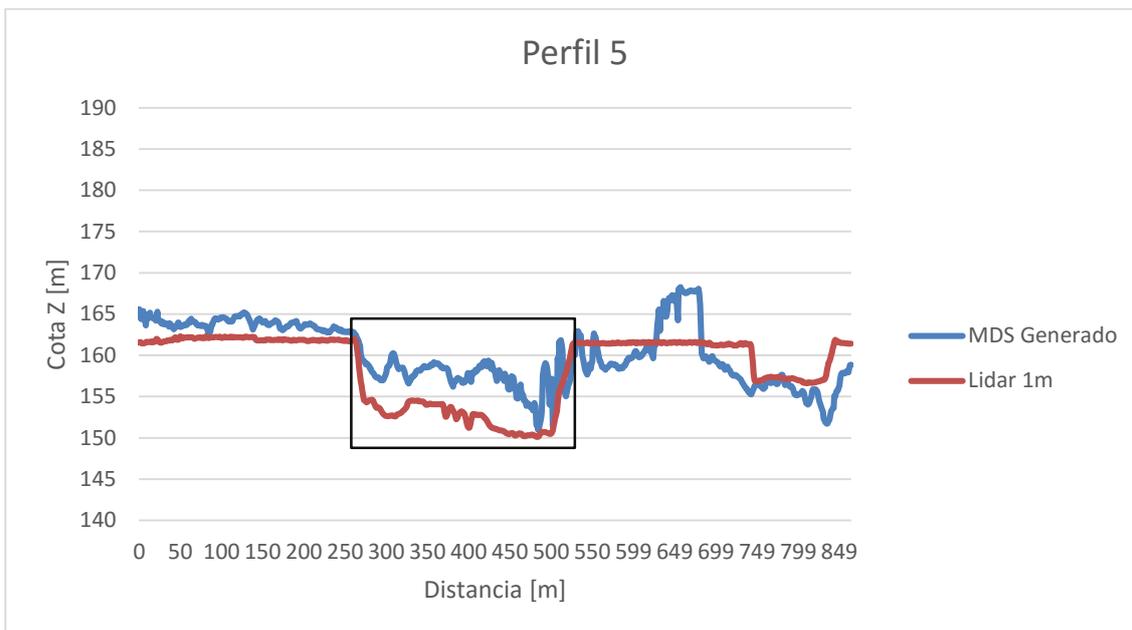


Gráfico 5: Perfil 5 sobre el barranco y las zonas colindantes

Finalmente, el perfil 6 (Gráfico 6), presenta de nuevo la aparición de canchales a los laterales del cauce fluvial. Por otro lado, en este caso, la crecida del río se aprecia considerablemente menos que en el resto de perfiles, sobretodo en el centro del cauce, donde la diferencia parece ser nula. No obstante, en los laterales sí se observa la crecida. El hecho de que la diferencia sea prácticamente nula en el centro del barranco puede ser debida a la sedimentación que ha provocado la elevación de la cota del cauce en la actualidad.

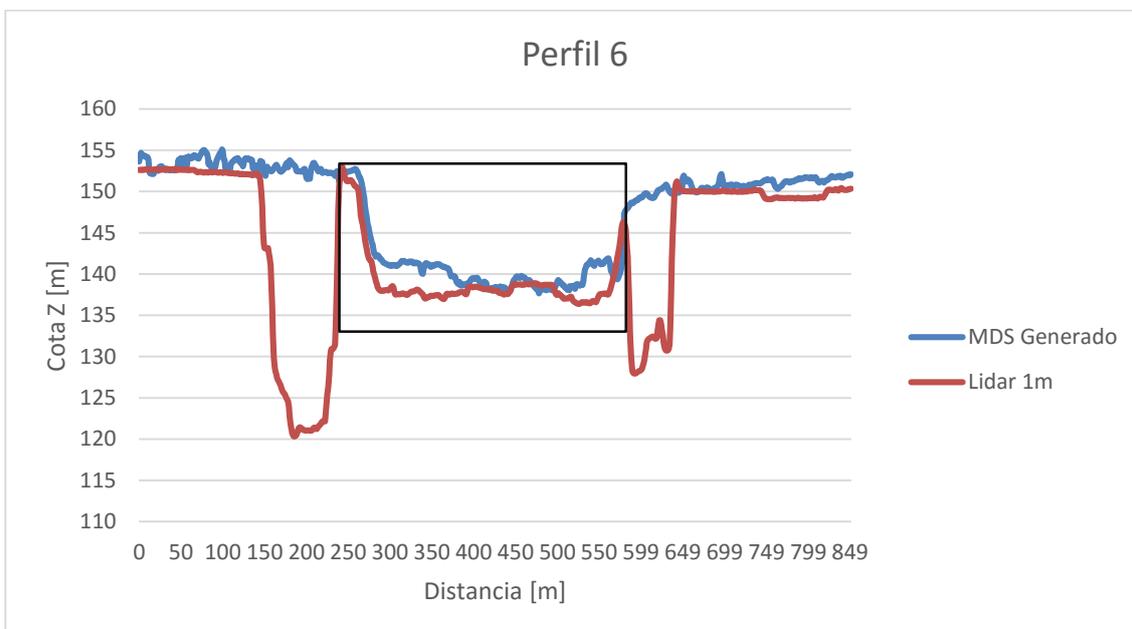


Gráfico 6: Perfil 6 sobre el barranco y las zonas colindantes

### 5.2.3. Estudio de puntos aleatorios

El siguiente estudio se basa en la colocación de puntos totalmente aleatorios por toda el área de estudio, excepto el área correspondiente al barranco. De ésta forma se puede comprobar la

cota altimétrica de cada punto en el modelo de 1957 y compararla con la cota correspondiente en el modelo actual. Ésta comparativa podrá mostrar, en el histograma que se genere, un análisis del cambio en el conjunto de puntos.

Para la selección de los puntos aleatorio se ha empleado la herramienta del software ArcGis, 'Create Random Points', que coloca aleatoriamente un número especificado de puntos dentro de una ventana de extensión o de las entidades de un polígono, una línea o una clase de elemento de puntos.

Cuando se busca generar puntos aleatorios en una extensión específica, el software crea una secuencia de números aleatoria e identifica un valor aleatorio en el eje X y otro en el eje X de la extensión, que se convierten en las coordenadas X e Y para un punto. Para seleccionar al azar el punto del eje X, se selecciona el siguiente valor sin usar la secuencia de números aleatorios y se transforma en una distribución uniforme con un valor mínimo y un valor máximo que corresponden a la extensión X. Se hace lo mismo para el eje Y. Los dos valores identifican el primer punto aleatorio. Este proceso se repite hasta alcanzar el número específico de puntos.

Para el estudio de la calidad del modelo obtenido, se genera un total de 100 puntos aleatorios dentro del área de estudio. No obstante, considerando la elevada probabilidad de que dichos puntos se generen dentro de la zona del barranco, se decide crear un total de 150 puntos, obteniendo así un margen en el que poder eliminar aquellos que estén situados dentro del barranco mediante la herramienta 'Clip Data'.

Una vez generados los puntos aleatorios, se deben obtener las cotas altimétricas correspondientes tanto al modelo generado como al actual mediante la herramienta 'Extract Multi Values to Points'. Seguidamente, se calcula la diferencia entre ambos modelos restando los campos obtenidos anteriormente. Finalmente, utilizando el valor de la diferencia entre modelos, se genera una representación utilizando una combinación de colores y símbolos graduados, mediante la que se puede visualizar rápida e intuitivamente la magnitud del error (Ilustración 33).

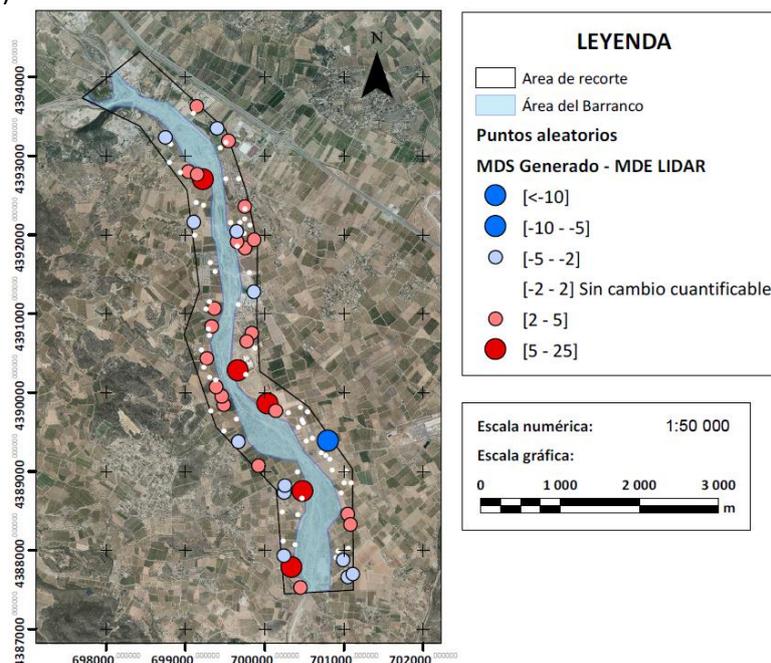
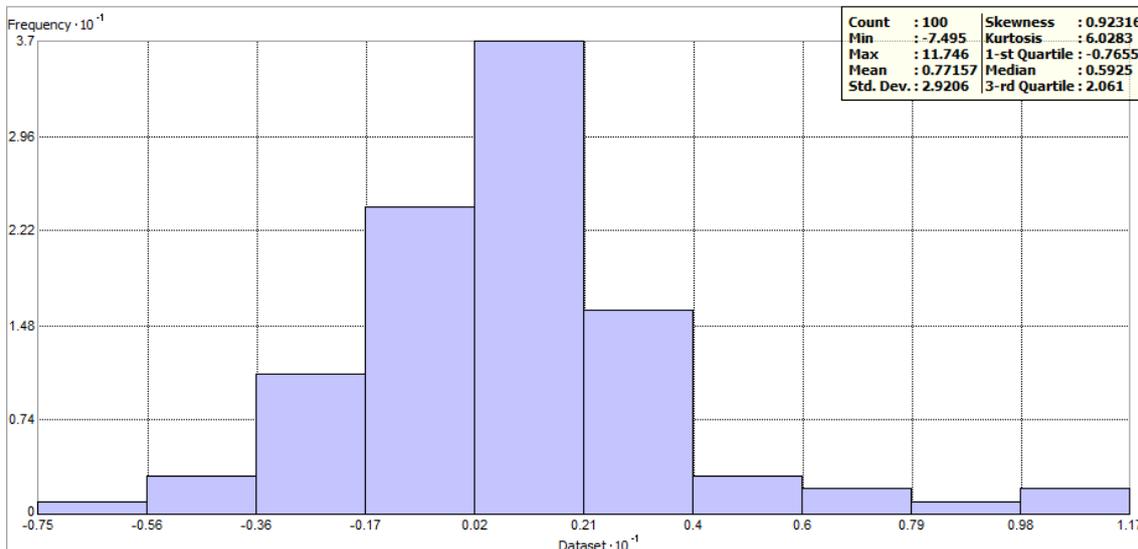


Ilustración 33: Resultado de la simbolización de los puntos aleatorios:

Además de la representación gráfica, resulta interesante la obtención de los datos estadísticos donde se puede ver que los valores máximo y mínimo presentan valores más elevados de lo esperado (*Gráfico 7*).



*Gráfico 7: Histograma de los puntos aleatorios sin eliminar puntos extremos*

Ya que el número de puntos es más elevado de lo previamente estipulado, se procede a realizar el estudio de los datos correspondientes a los valores extremos, considerando la eliminación de los mismos en caso de que dicha diferencia sea justificada.

#### 5.2.3.1. Estudio de puntos extremos

En dicho capítulo se procede a estudiar uno a uno los puntos con resultados más extremos, es decir, los que muestran una simbología de círculo más grande en tono rojo y azul intenso. Para ello, se numerarán siguiendo un orden de Norte a Sur, comenzando por el valor que se encuentra en la parte superior del área de estudio, bajando hasta el último punto extremo.

Los puntos en tonos rojos muestran que la cota de dicho punto en 1957 se encontraba sobrelevada al modelo actual. Los puntos azules representan todo lo contrario, el modelo actual se encuentra por encima del modelo generado de 1957. A medida que estos puntos se reducen de tamaño y disminuyen su tono exponen que no ha habido cambios representativos en la orografía, como los puntos totalmente blancos.

Con el objetivo de determinar si las diferencias más grandes corresponden a un error en la generación del modelo o, simplemente, a un cambio real en la orografía del relleno, se procede a presentar cada uno de los puntos mostrando su localización en la imagen del vuelo de 1957 y en la ortofoto actual.

En los puntos 1 y 6 (*Ilustraciones 34 a 37*), a pesar de observarse un cambio en el uso del suelo, este no debería ser suficiente para explicar la diferencia observada (7.464 y 7.740 metros, respectivamente), ya que un cambio de uso de suelo no debería suponer una diferencia mayor a 1 metro.

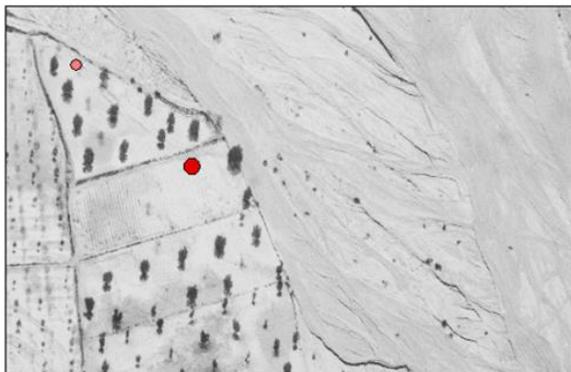


Ilustración 34: Punto extremo 1 en 1957



Ilustración 35: Punto extremo 1 en 2009

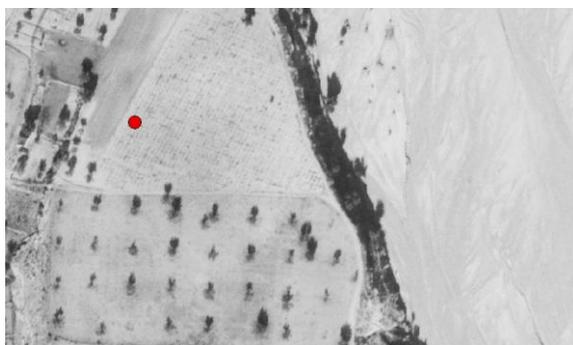


Ilustración 36: Punto extremo 6 en 1957



Ilustración 37: Punto extremo 6 en 2009

Debido a que no se puede obtener una conclusión clara sobre la razón de ser de dicha diferencia, se procede a la creación de un modelo de sombras, en el que se observa cómo la totalidad de las parcelas se encontraban sobre elevadas (*Ilustraciones 38 y 39*), pudiendo ser esta la razón de tal diferencia.

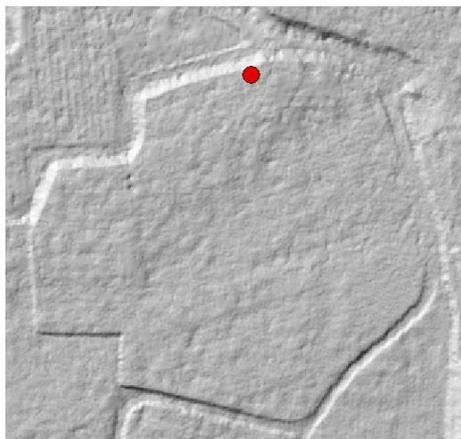


Ilustración 38: Sombreado en punto extremo 1 en 1957

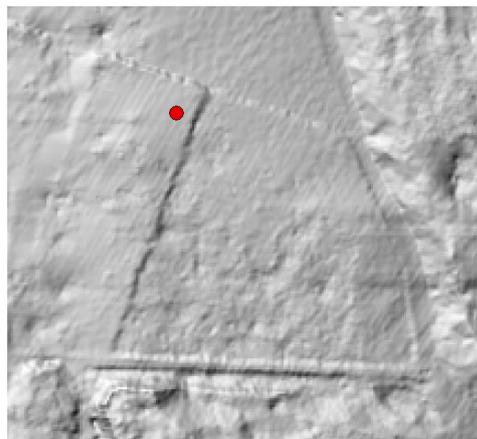


Ilustración 39: Sombreado en punto extremo 6 en 1957

En cuanto a los puntos 2, 3 y 5, el valor de la diferencia en todos ellos se debe a un cambio brusco en la orografía de la zona, como es la construcción de nuevas canteras, provocando así

que el modelo de 1957 aparezca considerablemente más elevado que el actual, presentando diferencias de 8.441, 11.746 y 10.949 metros, respectivamente (**Ilustraciones X X X**).



Ilustración 40: Punto extremo 2 en 1957



Ilustración 41: Punto extremo 2 en 2009



Ilustración 42: Punto extremo 3 en 1957



Ilustración 43: Punto extremo 3 en 2009



Ilustración 44: Punto extremo 5 en 1957



Ilustración 45: Punto extremo 5 en 2009

Finalmente, el único caso en el que se aprecia una diferencia negativa considerable, corresponde al punto 4 donde, en las fotografías de 1957, se aprecia un sombreado en el que se intuye que la parcela en cuestión se encuentra a menor cota que las colindantes. Además, se aprecia una considerable acumulación de sedimentos en la actualidad (*Ilustraciones 46 y 47*).



Ilustración 46: Punto extremo 4 en 1957



Ilustración 47: Punto extremo 4 en 1957

Con el objetivo de corroborar las conclusiones mencionadas anteriormente, se realiza un sombreado de la zona mediante el cual, se comprueba como efectivamente, la zona ha sufrido muchos cambios en la orografía (Ilustración 48).

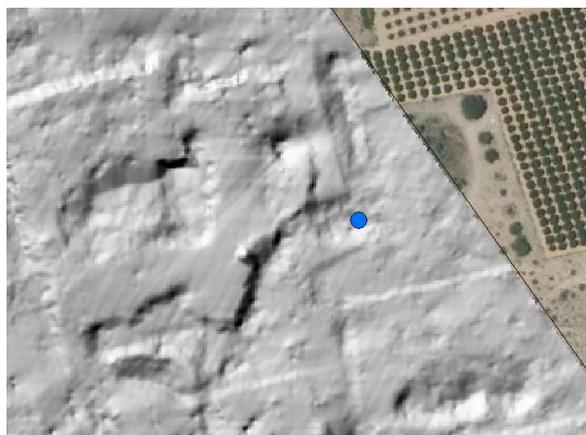


Ilustración 48: Sombreado en punto extremo 4 en 1957

Como conclusión tras haber estudiado por separado cada uno de los puntos, se puede afirmar que el modelo obtenido es de buena calidad, ya que los errores más grandes corresponden a cambios reales en el terreno y, por lo tanto, no se trata de errores producidos en el cálculo del modelo.

#### 5.2.3.2. Evaluación de cambios sin valores extremos

Ya que, como se ha explicado en el punto anterior, los elementos extremos corresponden a cambios justificados en el terreno, estos pueden ser eliminados para volver a realizar el análisis estadístico del conjunto de datos, comprobando así la mejoría de la desviación estándar. Esto es importante ya que el rango entre esta y el valor medio se utilizará como umbral de no cambio cuantificable para la realización del mapa de cambios. Una vez eliminados dichos puntos extremos, se observa como el resto de puntos aparecen con diferencias menores a los 5 metros (Ilustración 49).

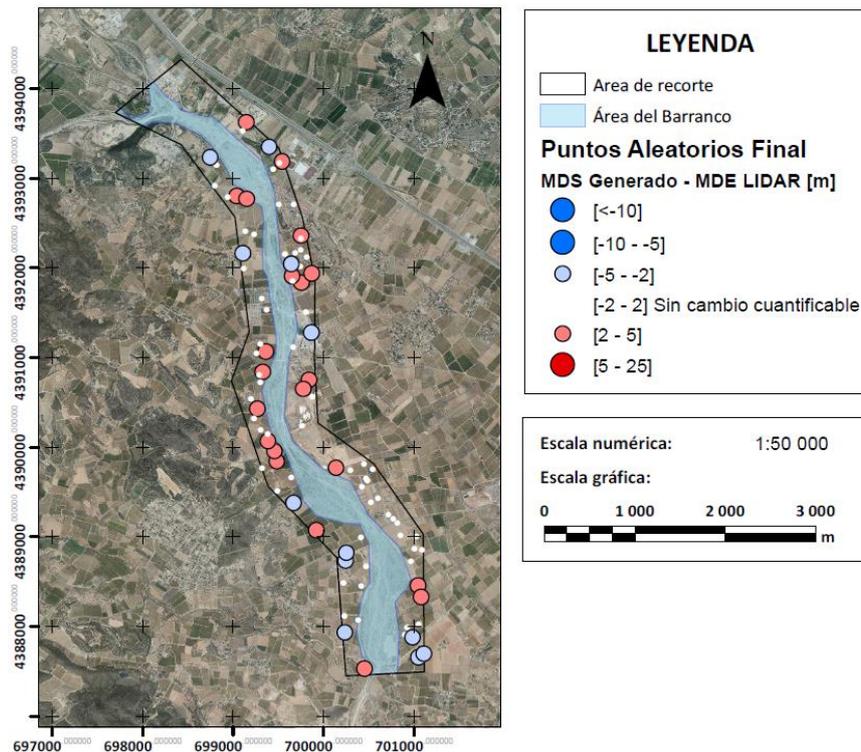


Ilustración 49: Puntos aleatorios tras la eliminación de los extremos

Además del resultado visual, se procede a realizar el cálculo del histograma junto a los estadísticos básicos que determinarán si los errores siguen una distribución normal o no, así como el umbral que se utilizará posteriormente para la generación del mapa de cambios. El análisis detallado de los errores se realizará más adelante, en el epígrafe '5.3. Estimación del error del MDS obtenido'.

### 5.3. Estimación del error del MDS obtenido

La evaluación del error obtenido tras la generación del MDS se lleva a cabo, en primer lugar, evaluando si dicho error sigue o no una distribución normal. Para ello, se analizan los estadísticos de coeficiente de asimetría y curtosis (*Gráfico 8*), los cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estandar.

En primer lugar, el coeficiente de asimetría, el cual hace referencia a la inclinación de la distribución, tiene un valor de -0.263, el cual indica una ligera asimetría hacia la derecha. No obstante, dicho valor está completamente dentro del rango de valores antes mencionado.

Por su parte, la curtosis, la cual describe el grado de esbeltez de la distribución, se encuentra fuera de rango, indicando que se trata de una distribución leptocúrtica. Esto, a pesar de estar fuera del rango de la distribución normal, no es un dato desfavorable, ya que, en definitiva, indica que hay una mayor cantidad de valores agrupados alrededor de la media y, por lo tanto, una mayor cantidad de datos correspondientes a errores mínimos.

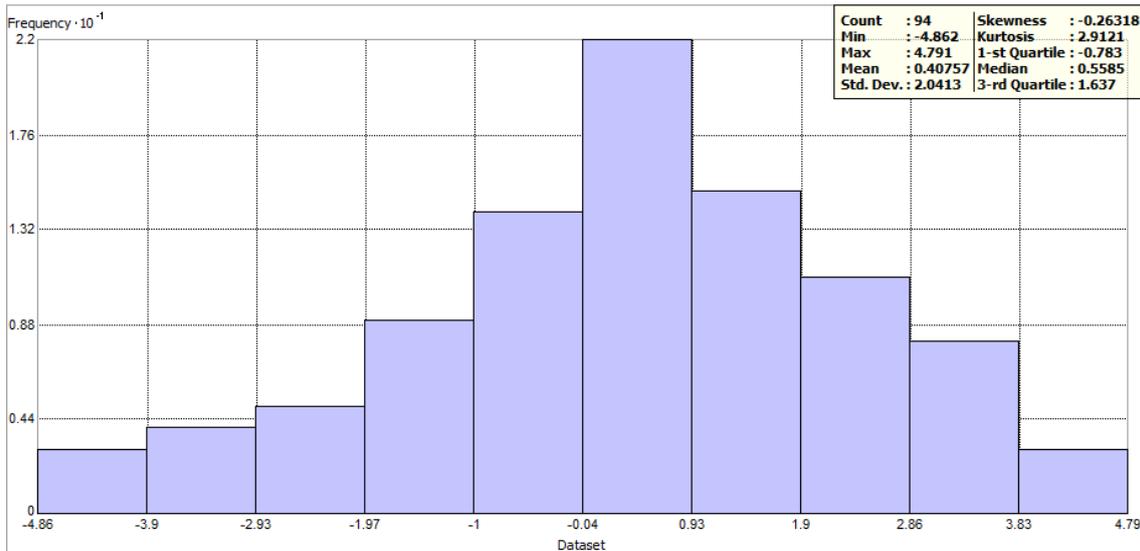


Gráfico 8: Histograma de los puntos aleatorios tras eliminar valores extremos

Ya que solamente uno de los dos estadísticos está dentro del rango de la distribución normal, se procede al estudio de gráficos que esclarezcan si la distribución es normal. En primer lugar, se genera el gráfico de cuantil-cuantil (Gráfico 9), en el que se observa como los datos se acoplan casi perfectamente a la línea que representa una distribución normal estándar.

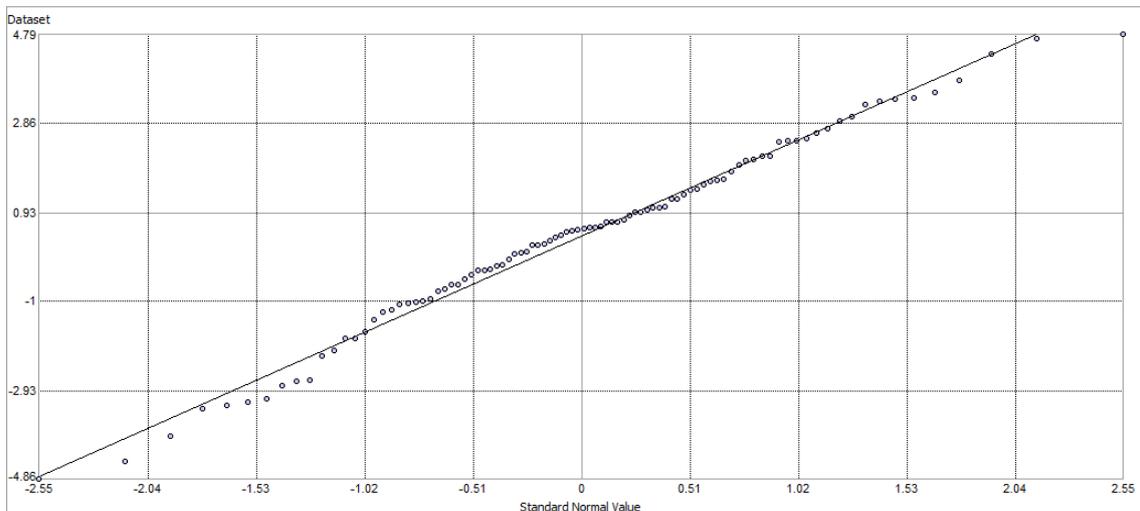


Gráfico 9: Gráfico cuantil-cuantil de los puntos aleatorios tras eliminar valores extremos

Con todos los datos aportados tanto por los estadísticos de curtosis y sesgo estandarizado, como por el gráfico cuantil-cuantil, se puede concluir que los datos, efectivamente, siguen una distribución normal.

Finalmente, se procede a analizar la distribución de los mismos utilizando el diagrama de caja y bigotes, buscando corroborar la conclusión anterior. El objetivo de dicho diagrama es la representación ordenada de los datos. Observando el funcionamiento del diagrama (Ilustración 50), se puede comprobar como el 50% de los datos está contenido en la caja, lo cual indicará si los datos están muy concentrados o no según el tamaño de la misma. Por otra parte, la línea situada en el medio de la caja, indica la posición de la mediana, es decir, el segundo cuartil, mientras que el primer y el tercer cuartil están representados en la parte inferior de la caja

respecto a la mediana y la parte superior, respectivamente. La media, por su parte, se representa como un punto dentro de la caja. Por último, los valores atípicos, son representados fuera de la línea como círculos.

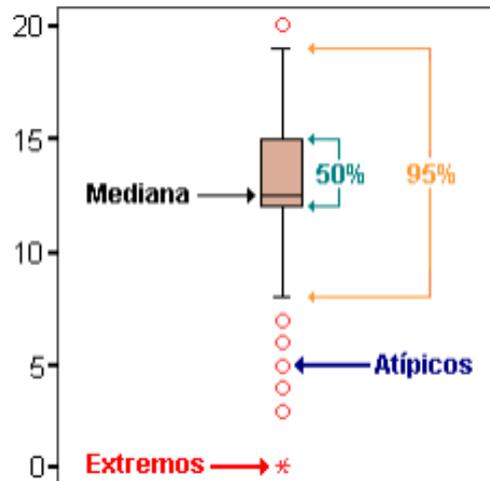


Ilustración 50: Explicación gráfica del diagrama de caja y bigotes

Por lo tanto, tras la evaluación del gráfico de caja y bigotes (*Gráfico 10*), se observa cómo se corroboran los datos mostrados en las estadísticas anteriores, donde la mediana está a la derecha de la media (dato aportado por el sesgo estandarizado). Por otro lado, también se afirma que la distribución está muy agrupada en la media, como se deducía al observar el valor de la curtosis. Finalmente, se observa la aparición de un valor atípico, el cual se sitúa en 4.8 metros, valor que en este caso está considerado como no extremo.

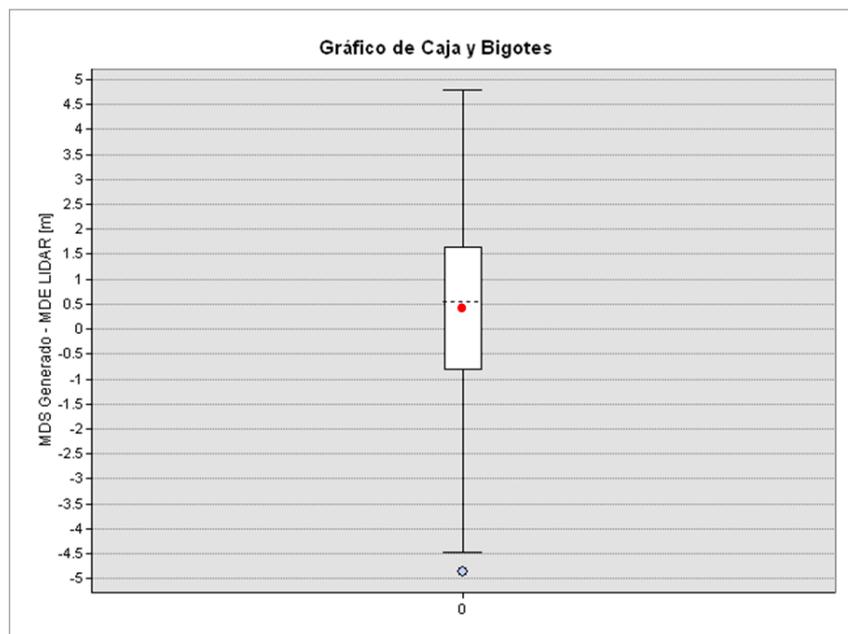


Gráfico 10: Diagrama de caja y bigotes de los puntos aleatorios sin valores extremos

Una vez corroborado el hecho de que las diferencias estudiadas siguen una distribución normal, se procede a elegir un umbral para la generación del mapa de cambios. Para ello, se observan los valores de la media y la desviación estandar (*Gráfico 8*), de donde se observa que los datos

se centran en el valor de diferencia de 0.4076 metros, y la desviación estandar, que muestra la dispersión de la distribución, presenta un valor de 2.0413 metros. Por ello, si se aplica el valor de la desviación típica, de forma positiva y negativa, al valor de la media, se establece un umbral de diferencia relativa, es decir, el umbral que contiene a los valores de diferencia no significativa, sin cambio cuantificable, y fuera de dicho umbral los valores de diferencias comienzan a ser representativos.

Según el objetivo de éste estudio, se ha establecido un umbral de diferencia sin cambio cuantificable que va desde -2 a 2 metros. Éste paso, en dicho estudio, es de vital importancia, puesto que de esta forma se valora el mapa de cambios a obtener entre el modelo generado con las imágenes de 1957 y el modelo actual datado en 2009.

Como se puede observar en el capítulo de Anejos, 'Mapa de Cambios 1957 – 2009', se ha generado un mapa en el que se pueden visualizar las zonas de cambio positivo, en el que el modelo de 1957 se encuentra por encima del modelo actual, y cambios negativos, donde sucede lo contrario. Las áreas que se encuentran dentro del umbral de no cambio aparente, no se encuentran simbolizadas en dicho mapa, sino que se puede observar el territorio actual gracias a la ortofoto del PNOA.

#### 5.4. Estudio de diferencias volumétricas

Seguidamente, se procede a realizar un cálculo de diferencias volumétricas entre ambos modelos. Esta información resulta de gran interés para el conocimiento de la cantidad de sedimentación arrastrada por la riada. Para ello, en primer lugar, se realiza una división de la zona de estudio en 7 secciones de 1500 x 1500 metros con zonas de solape entre las mismas, sobre las que se realizarán los cálculos por separado.

Una vez establecidas las secciones mediante la creación de un fichero shapefile poligonal, se procede a cortar el mapa de cambios con cada una de las secciones, utilizando la herramienta '*Split Raster*' de ArcGIS. Seguidamente, se corta el fichero shapefile que delimita la zona de estudio mediante la herramienta '*Split*' de ArcGIS, generando así diversos polígonos que serán utilizados para delimitar la zona de cálculo de las estadísticas.

Mediante el uso de las zonas obtenidas, es posible calcular las estadísticas zonales a partir del mapa de cambios, el cual expresa, como se ha comentado anteriormente, la diferencia entre el MDS de 1957 y el MDE actual. Dicha diferencia consiste en un valor de diferencia en cota expresada en metros. Para obtener la diferencia expresada en volumen, es necesario obtener dicho valor respecto al área elegida.

Para la obtención de las estadísticas por píxel dentro de un área se utiliza la herramienta '*Zonal Statistics*' de ArcGIS la cual calcula estadísticas sobre valores de un ráster dentro de zonas de otro dataset. En dicha herramienta se especifica el ráster de entrada y el elemento que hará la función de zona. Finalmente, se especifica el tipo de estadísticas a calcular, entre los que se encuentra el sumatorio de todos los valores digitales de los píxeles en el ráster dentro de la zona especificada.

En este caso, los niveles digitales corresponden a diferencias de cota, por lo tanto, mediante el sumatorio de las mismas, se obtiene la diferencia de cota total en el área seleccionada expresada en metros. Seguidamente, multiplicando dicho valor por el área de la zona seleccionada, se obtiene el valor del cambio volumétrico expresado en metros cúbicos. Debido al tamaño de dicho valor, se expresa finalmente en kilómetros cúbicos. El mapa de cambios volumétricos obtenido tras este proceso se puede consultar en el Anexo de planos, concretamente bajo el título de 'Mapa de cambios volumétricos 1957 – 2009'.

Adicionalmente a la obtención de dicho mapa, se genera una gráfica de líneas para estudiar la evolución de la diferencia volumétrica en cada una de las áreas seleccionadas (Gráfico 11).

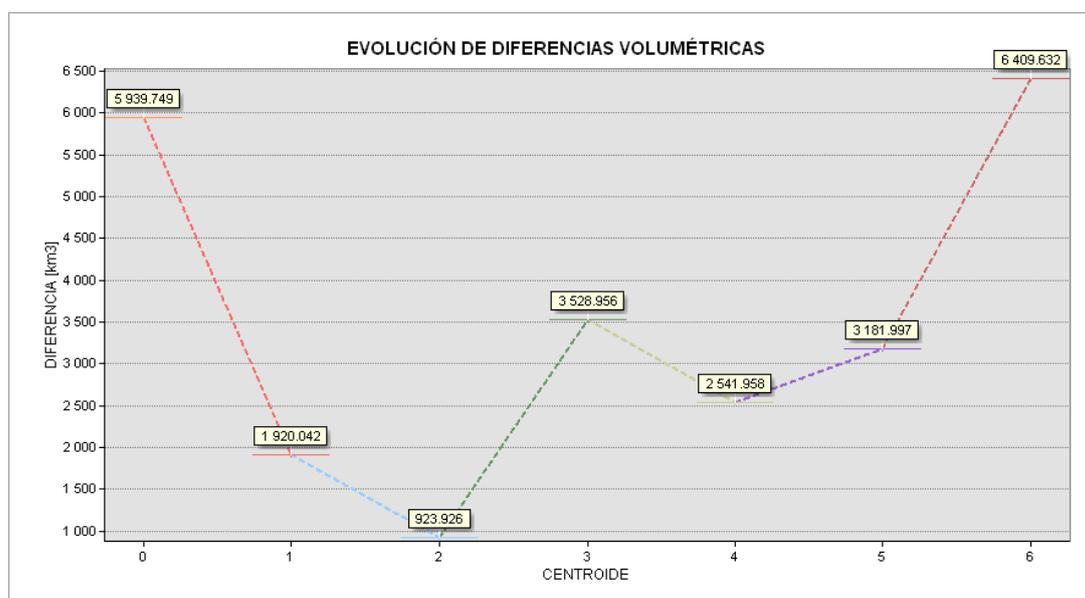


Gráfico 11: Gráfico de evolución de diferencias volumétricas

En dicha gráfica, puede observarse cómo la mayor diferencia volumétrica aparece en las áreas primera y última, encontrando el valor más bajo en la tercera. Además, en la gráfica en cuestión se puede observar el valor de la diferencia en cada una de las áreas, expresado en un cuadro de texto sobre el punto en cuestión.

Con el objetivo de explicar los resultados obtenidos, se observan las zonas en el mapa de cambios, la ortofoto del PNOA y las imágenes de 1957, obteniendo así una serie de conclusiones.

- En primer lugar, la gran diferencia observada en las áreas primera y última, puede ser debida, en gran parte, al hecho de que corresponden a la primera y última imagen, las cuales tienen menor área de solape.
- En cuanto a la tercera área, que muestra la tasa de menor cambio, puede deber su valor al hecho de la aparición de zonas con cambio negativo, las cuales compensan a las zonas de cambio positivo, obteniendo finalmente un resultado menor.
- Uno de los factores que afecta al cambio registrado es la aparición de canteras en la zona, las cuales provocan una diferencia considerable de cota entre 1957 y 2009.

## 5.5. Análisis de alternativas metodológicas de la fase 1

Como se ha explicado en el capítulo '5.1.4. Resultado del modelo procesado con la nube de puntos filtrada', los datos de partida informan de que se van a producir errores en los resultados. No sólo eso, sino que la alineación de las imágenes en el momento de la toma ya muestra diferencias evidentes. Por ello, al procesar el modelo obtenido con la nube de puntos se aprecian franjas transversales al barranco del río Turia, que coinciden con los márgenes de las fotografías.

Al descubrir como resultado estas barreras en el modelo, se toma la decisión de comprobar, mediante diversos estudios previos, si pudiera darse el caso de mejorar los resultados e incluso eliminar dichas barreras.

Por ello, persiguiendo el objetivo de corroborar que la solución adoptada es la mejor posible, se han realizado diversas alternativas metodológicas a la Fase 1 realizada, donde se realiza el primer paso de tratamiento de datos brutos y creación de la nube de puntos, empleando diversos criterios que se explican a continuación.

- Enmascaramiento de las imágenes

Como primer estudio se ha procesado el enmascaramiento de las imágenes iniciales. Las máscaras se utilizan para especificar las áreas en las fotos que pueden ser confusas para el programa o conducen a resultados incorrectos de reconstrucción, tales como elementos pequeños que no se diferencien demasiado, o cualquier elemento que no sea parte del objeto a levantar. Por ello, se ha adoptado la idea de enmascarar los márgenes de las imágenes iniciales, puesto que como se ha comentado previamente, éstos pueden ser los causantes de las franjas transversales que aparecen en el modelo. Por ello, éste estudio podría ser la solución del problema.

El enmascaramiento se ha generado mediante el software PhotoScan. Estas máscaras se pueden aplicar en cualquiera de las etapas de procesamiento, pero se recomienda utilizarlas antes de la orientación de fotografías para no tener que repetir el enmascaramiento en el caso de que existiese algún error. Dicho error se podría subsanar añadiendo más imágenes o marcadores y, una vez añadidos estos, se debería de volver a realizar todo el procedimiento. El proceso de la creación de la nube de puntos densa y la malla es más lento que el de alineación, por lo que emplear las máscaras en primer lugar, nos puede ahorrar mucho tiempo.

Las máscaras se generan de forma individual para cada imagen. Para editar la máscara, se abre la foto que se quiere modificar haciendo doble clic sobre su nombre en el panel espacio de trabajo. La foto se abrirá en la ventana principal. El proceso que se ha seguido en este trabajo ha sido seleccionar, mediante la herramienta '*Magic Wand*', las zonas correspondientes a los márgenes de cada imagen, de forma que delimita las áreas que son confusas frente a las que no lo son. En el caso de que algún elemento de dichos márgenes aparezca sin seleccionar, éste se puede añadir a la selección mediante la herramienta '*Intelligent Scissors*', que funciona a modo de lazo magnético, creando una selección delimitada por los vecinos con similar respuesta radiométrica. El último paso para crear la máscara es, una vez se tenga seleccionada toda el área que se precise, como se acaba de comentar, la herramienta '*Add Selection*' crea la máscara directamente.

Cuando todas las imágenes tienen la máscara generada (*Ilustración 51*), se pueden realizar los mismos pasos metodológicos que se han comentado previamente, para crear la nube de puntos. Pero los resultados obtenidos tras éste estudio no fueron mejores que el proceso metodológico ya detallado. Las barreras transversales se siguen localizando por todo el modelo, como resultaba con el procesamiento ya generado. Por ello esta alternativa ha sido rechazada, puesto que no aporta una mejoría en los resultados e incluso supone un empleo de tiempo la creación de las máscaras.



*Ilustración 51: Ejemplo de fotografía enmascarada*

- Procesado de la nube de puntos en coordenadas relativas

Otra de las posibles causas de los errores generados en PhotoScan, referentes a la incorrecta alineación de las fotografías, que puede ser el causante de la aparición de las barreras anteriormente mencionadas, es la utilización de puntos de control, ya que pueden estar provocando resultados incorrectos al aplicar el algoritmo SfM, produciendo irregularidades en la determinación de la posición de la toma fotográfica.

Dicho error tiene lógica si se tiene en cuenta el hecho de que las fotografías son antiguas, han sido escaneadas y modificadas geoméricamente, por lo que, el hecho de añadir constricciones mediante los puntos de control, podría provocar un error en la determinación del modelo. Es por esta razón, por la que se decide realizar un ajuste de las fotografías sin utilizar los puntos de control. Por ello, tras la alineación de las imágenes mediante PhotoScan, en vez de emplear el fichero de puntos de control, se sitúan directamente sobre el proyecto puntos de apoyo que sean coincidentes en varias imágenes, suficientemente definidos y distribuidos por toda el área de solape entre pares estereográficos. De ésta forma, el programa busca las correlaciones entre dichos puntos rápidamente, sin reajustar el modelo generado con el empleo de coordenadas.

Al aplicar el ajuste sin puntos de control, se está utilizando el algoritmo SfM básico sin restricciones, es decir, obteniendo los parámetros de orientación interna y externa a través de la obtención de entidades homólogas mediante el algoritmo SIFT.

El resultado obtenido al procesar el modelo sin añadir puntos de control tiene coordenadas locales, por lo tanto, se precisa una georreferenciación utilizando un software externo como, por ejemplo, Cloud Compare o Meshlab. No obstante, tras comparar la nube de puntos obtenida en coordenadas locales con la nube generada anteriormente, se comprueba que el resultado obtenido en coordenadas locales, presenta los mismos errores, por lo tanto, esta alternativa metodológica resulta desestimada puesto que no aporta una solución al problema.

- Corrección radiométrica previa de las imágenes.

Como ya se ha comentado en varias ocasiones, las imágenes muestran diferencias en cuanto a la información radiométrica entre pares consecutivos. Dicha información es escasa, ya que las imágenes contienen zonas difuminadas y con poco contraste, las cuales pueden confundir al algoritmo de procesamiento de PhotoScan y crear errores aleatorios sin criterio.

El contraste, iluminación y brillo de cada imagen, además de variar en pares consecutivos, también provocan que la información, dentro de una misma imagen, sea confusa, puesto que no marca claras diferencias entre diferentes elementos contenidos en ella. Un ejemplo son los puntos de apoyo que el propio algoritmo del programa toma dentro del tramo del barranco de forma automática, partiendo de que ya es una fuente de error la información que se pueda extraer en zonas inundadas. De ésta forma, el mismo software puede estar generando errores en el procesamiento de la triangulación interna, buscando correlaciones en puntos dentro del barranco que no sean el mismo, o incluso en la búsqueda de un mismo punto en diferentes imágenes, provocado por el cambio de valor de nivel digital del píxel de apoyo.

Debido a estas razones, se ha planteado que el problema podía estar generado a partir de la información radiométrica de las imágenes de entrada. Por ello, con el objetivo de intentar corregir dicho error, se busca realizar un ajuste de contraste previo al tratamiento de las imágenes, empleando los filtros 'Lineal' (Ilustración X) y 'Ecuilizador' (Ilustración X) del software Envi de tratamiento de imagen digital.

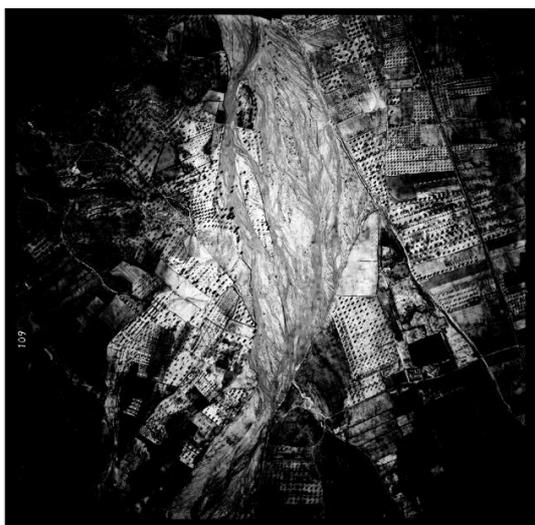


Ilustración 52: Resultado tras aplicar el filtro lineal



Ilustración 53: Resultado tras aplicar el filtro ecualizador



Como puede observarse, el filtro lineal ofrece un mal resultado para el objetivo de este proyecto, ya que, a pesar de resaltar la zona del barranco, oscurece de forma excesiva los alrededores, invalidando así la imagen para el proceso fotogramétrico.

Por otro lado, el filtro ecualizador, si mejora la visualización de la imagen, estableciendo un mayor contraste en la misma.

No obstante, a pesar de mejorar la calidad de las imágenes, el resultado obtenido tras realizar de nuevo todo el procesamiento de los datos tras aplicar el filtro ecualizador, sigue siendo el mismo, presentando la aparición de las bandas en el modelo. Por lo tanto, debido a que el resultado no ha cambiado considerablemente y a que el tiempo de ejecución de esta alternativa metodológica es considerablemente mayor, se desestima la utilización de la misma.

## 6. APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Tras la obtención del mejor modelo posible a partir de las fotografías de 1957, es posible generar diversas aplicaciones basándose en la utilización del mismo. Gracias al mapa de cambios obtenido, donde se observan las variaciones volumétricas, se pueden realizar las siguientes aplicaciones:

- Estudio de la acumulación de sedimentos producida durante la riada, aportando así un considerable valor a los estudios geomorfológicos del suceso.
- Estudio de las zonas inundadas por la riada, comprobando así que parcelas fueron damnificadas tras el incidente, pudiendo llegar a desaparecer todo rastro de cultivo anterior.
- Análisis de cambios de uso de suelo, ya que desde 1957 a 2009, se producen diversos cambios en el tipo de cultivo o incluso en el uso de la parcela, pudiendo pasar de uso rústico, a zona urbana e industrial.
- Análisis de cambios en la orografía del terreno correspondientes a nuevas áreas de extracción de material, pudiendo realizar estudios sobre la gran proliferación de canteras en la zona, con el cambio volumétrico de material que ello conlleva.
- Establecimiento de una metodología de obtención de MDE a partir de fotografías antiguas de mala calidad, facilitando así la labor de futuras investigaciones.
- Ampliación del estudio a todo el cauce del río Turia, pues siguiendo la metodología utilizada y aplicándola al resto de fotografías del vuelo, se obtendrían los mismos resultados que en este estudio.
- Aporte de documentación a la catástrofe de la riada, puesto que la misma es escasa, limitándose, en la mayoría de los casos, a documentación periodística y fotográfica.

## 7. DISCUSIÓN

Llegados a este capítulo, es imprescindible valorar el resultado final del estudio, extrayendo las ventajas e inconvenientes que éste presenta y el error final cometido, así como comentar en líneas futuras las mejoras metodológicas que podrían realizarse tras observar los resultados o posibles caminos con los que continuar complementando el proyecto.

Con todo ello, partiendo de lo comentado en varias ocasiones acerca de las limitaciones que contienen los datos de partida, es importante comentar que el resultado obtenido muestra una destacable mejora de la idea inicial que se esperaba, con la información ya comentada.

La nube de puntos procesada en Photoscan en coordenadas absolutas, es decir, mediante la orientación a través de puntos de apoyo que se mantienen en la actualidad, ha sido resuelta con un error medio de 4.40 metros, inferior a 5 metros de error, lo que muestra un resultado bastante aceptable, partiendo de las limitaciones de los datos de partida y de la tecnología de la época, puesto que éste vuelo fue uno de los primeros realizados en el país. Tras la generación de diversos modelos de elevaciones y de superficies, partiendo de las diferentes alternativas metodológicas comentadas en el capítulo '5.5. Análisis de alternativas metodológicas de la fase 1', se han evaluado todos los resultados obtenidos y en todas las situaciones éstos han sido considerablemente más desfavorables que el que se presenta en éste estudio. Cabe destacar que no sólo se ha comparado cada alternativa con el modelo procesado y el actual, sino que dichas alternativas también se han combinado entre ellas para poder evaluar todos los casos posibles planteados en el tiempo de realización. La evaluación del modelo final, como muestran las estadísticas y la visualización gráfica, contrasta las áreas de cambio producido y destaca en su mayoría el emplazamiento del barranco formado tras *'La batalla del barro de 1957'*, lo cual es uno de los objetivos fijados en dicho estudio, para la realización de proyectos de documentación geomorfológica del suceso.

En general, el estudio realizado cumple con los objetivos prefijados, situándose dentro del umbral de tolerancia aceptable para poder tomar los resultados como ciertos. No obstante, es considerable discutir acerca de los errores mostrados en la solución final, tales como las franjas transversales al barranco y una posible mejora de la precisión de los resultados, para así poder direccionar una línea de flujo de trabajo futura, con la que continuar realizando estudios de mejora de los resultados, con más tiempo disponible y mediante distintas tecnologías. Dentro del punto final comentado, se concluye que podrían realizarse mejoras en cuanto a la localización de puntos de apoyo conservados en la actualidad, ampliando la cantidad de éstos y respaldando el cálculo de sus coordenadas, tomando éstas sobre el terreno mediante topografía clásica o GPS. Mediante el empleo de mayor cantidad de puntos de control, el ajuste en PhotoScan se realizaría con un número mayor de grados de libertad, con lo que podrían eliminarse mayor cantidad de puntos que cometan un error más elevado, pero sin perder la consistencia geométrica necesaria para el ajuste. También podría realizarse un escaneo del área de estudio mediante un Láser Escáner, con el cual realizar una comparativa a través de la creación de un modelo más actual que el empleado en el proyecto. Finalmente, podría ampliarse un estudio previo de tratamiento digital de las imágenes de partida, con softwares específicos, partiendo de un tratamiento radiométrico exhaustivo con el cual es posible que se eliminasen las barreras generadas en el resultado. Con todo ello, aquí se han especificado los pasos a poder realizar en los posibles proyectos de mejora de dicho estudio.

## 8. CONCLUSIONES

El proyecto resulta realmente interesante desde el punto de vista de la geomática, ya que abarca desde el empleo de la fotogrametría para el tratamiento de las imágenes aéreas y la generación del modelo tridimensional, hasta el análisis del mismo y sus estadísticas mediante Sistemas de Información Geográfica, resultando así un proyecto bastante completo y que, además, tiene su aplicación práctica en el mundo real, haciéndolo mucho más atractivo.

Por otra parte, es una gran satisfacción poder aportar documentación útil e interesante para la documentación y el estudio de un acontecimiento histórico tan importante como fue la riada de 1957. Además, resulta también satisfactorio mostrar al mundo las posibilidades que puede ofrecer una titulación como Geomática al estudio medioambiental, aportando la información de base y las herramientas para el desarrollo de futuros proyectos por diversos sectores del ámbito académico.

En cuanto a la realización del proyecto en sí, considero que los objetivos iniciales se han cumplido en su totalidad a pesar de las dificultades encontradas en el trayecto. No obstante, a modo de introducción para futuros trabajos, considero necesario remarcar la importancia de la obtención de las imágenes originales.

Las fotografías utilizadas en este proyecto estaban modificadas geoméricamente por ordenador, como se ha comentado anteriormente. Por lo tanto, posiblemente, en caso de contar con las imágenes originales, en las que se puedan observar los datos de calibración, y los fotogramas no estén alterados, el resultado podría mejorar considerablemente.



Ilustración 54: Azulejo indicando la cota del agua en la riada, situado en Carrer del Museu, Valencia

## 9. GLOSARIO

**CONTRASTE:** Razón existente entre la energía emitida o reflejada por un objeto y sus alrededores más inmediatos. El contraste en una imagen es un indicio de la información que proporciona y suele expresarse con la varianza de sus ND.

**CORRECCIÓN GEOMÉTRICA:** Transformación de la imagen consistente en el desplazamiento de las celdas de su posición original para minimizar las distorsiones existentes en la misma, con el propósito de darle a aquélla validez cartográfica. Cuando la corrección geométrica conlleva dotar de coordenadas cartográficamente válidas al conjunto de celdas se habla de georreferenciación.

**ETRS89:** De las siglas en inglés de *'European Terrestrial Reference System'* 1989, en español Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989. Es un sistema de referencia geodésico ligado a la parte estable de la placa continental europea. Este datum geodésico espacial es consistente con los modernos sistemas de navegación por satélite GPS. Desde el 29 de agosto de 2007 un Real Decreto regula la adopción en España del sistema de referencia geodésico global ETRS89, sustituyendo al sistema geodésico de referencia regional ED50 y el sistema REGCAN95 en el ámbito de las Islas Canarias, permitiendo una completa integración de la cartografía oficial española con los sistemas de navegación y la cartografía de otros países europeos.

**FILTRO:** Operador local mediante el cual se obtiene una nueva imagen cuyos ND son función de los ND originales y de los de las celdas contiguas. Dependiendo del tipo, se utilizan para suavizar y eliminar ruido, o bien para realzar los rasgos lineales de una imagen.

**FORMATO RASTER:** Forma de tratamiento y representación espacial de las entidades mediante la disposición de celdas o píxeles en forma de matriz numérica de ND.

**Georreferenciación:** Procedimiento mediante el cual se dota de validez cartográfica a una imagen digital corrigiendo geoméricamente la posición de las celdas y atribuyéndoles coordenadas en algún sistema de referencia. La información georreferenciada es aquella que está realmente vinculada a cierto lugar del territorio y, por lo tanto, muestra su ubicación real. En cambio, la información georreferenciable es aquella que es susceptible de ser georreferenciada, es decir, puede vincularse a una determinada ubicación, a un determinado lugar concreto, pero todavía no se ha vinculado.

**LIDAR:** Acrónimo del inglés *'Light Detection and Ranging'*, o *'Laser Imaging Detection and Ranging'*. El LIDAR es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado o de onda continua. En el contexto de este Trabajo Final de Grado, se utilizará el término LIDAR para referirse a los datos ya procesados en forma de modelo digital de elevaciones (MDE) obtenido a partir de dicha técnica.

**MARCAS FIDUCIALES:** Son aquellas marcas ubicadas en las esquinas o parte media de los bordes de la fotografía. Uniendo las marcas fiduciales opuestas es posible encontrar el punto central de la foto, el que a su vez permite establecer la dirección de vuelo.

**MDE:** Modelo Digital de Elevaciones. Es un caso particular del Modelo Digital del Terreno (MDT) en el que se muestra una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

**MDS:** Modelo de superficie terrestre que incluye todos los objetos que esta contiene, desde árboles, viaductos, puentes, ...etc. Caso particular del Modelo Digital del Terreno.

**MDT:** se describe como "una representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas X, Y, Z respecto a un sistema de georreferenciado conocido", es decir, un MDT es un documento con información de la elevación del terreno (eje Z) respecto a un sistema de coordenadas (*J. Pereira, 2014*).

**NIVEL DIGITAL (ND):** Se trata del valor numérico discreto asignado por el sistema formador de imágenes a cada celda en respuesta a la irradiancia recibida sobre el plano focal del sensor. Se le conoce asimismo como nivel de gris, luminancia, número digital, valor de pixel, etc. Existe una relación lineal entre el ND grabado y la radiancia correspondiente a cada celda de terreno.

**OUTLIER:** Las observaciones atípicas, o outliers, son observaciones inconsistentes con el resto del conjunto de datos (*Barnett and Lewis, 1994*).

**PUNTOS DE CONTROL:** Son una serie de puntos utilizados en la búsqueda de las funciones de transformación que permitan la corrección de las distorsiones de una imagen.

**RESOLUCIÓN:** Capacidad de un sistema sensor para distinguir información de detalle en un objeto. En teledetección se habla de distintos tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

**SFM:** 'Structure From Motion' en sus siglas en inglés. Se trata de una técnica fotogramétrica basada en la visión por computador, donde no resulta necesario conocer las posiciones de la cámara, sus escalas y sus orientaciones. El procedimiento consiste en la extracción de puntos comunes en todas las fotografías mediante el algoritmo SIFT, reconstruyendo, posteriormente, la imagen desde los diferentes puntos de vista posibles. Determinados softwares realizan representaciones 3D inmediatas a partir de dichos datos. Esta técnica aporta un gran avance en cuanto a tiempo y coste frente a los métodos fotogramétricos tradicionales.

**SIFT:** 'Scale-invariant feature transform' (o SIFT) es un algoritmo usado en visión artificial para extraer características relevantes de las imágenes que posteriormente pueden usarse en reconocimiento de objetos, detección de movimiento, registro de la imagen y otras tareas.

**UTM:** De las siglas en inglés 'Universal Transversal Mercator'. Es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator. Sus coordenadas se expresan en metros.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Vián, Á. (2013). *'Sistema de apoyo a la toma de decisión sobre ArcGIS'*.
- Barnett, V., Lewis, T. 1994 *'Outliers in Statistical Data'* 3rd edn John Wiley Sons, NY
- Boufama, B., Mohr, R., Veillon, F., 1993. *'Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction'*. Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision, Berlin, Germany, pp. 466–470
- Castellano, C. P., & García, F. F. *'La riada de Valencia de 1957: reconstrucción hidrológica y sedimentológica y análisis comparativo con la situación actual'*.
- Förstner, W., 1986. *'A feature-based correspondence algorithm for image matching'*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 26, 150–166.
- García, J. L. L. (2002). *'Fotogrametría moderna: analítica y digital'*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Harris, C., Stephens, M., 1988. *'A combined corner and edge detector. Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference'*, Manchester, pp. 147–151.
- McGaughey, R. J. (2010). *'Manual FUSION/LDV Software for LiDAR Data Analysis and Visualization'*. United State, Department of Agriculture, Forest services, research station.
- Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez-Solano, R., Martín, L., & Bachiller, I. (2010). *'Topografía, cartografía y geodesia'*.
- Pérez, J. A. (2001). *'Apuntes de Fotogrametría I, II y III'*. Mérida.
- Photoscan, A. (2013). *'Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.0. 0'*. St. Petersburg: Agisoft LLC.
- Portugués, I., Carmona, P., Bonache, X., & Marco, J. B. *'Materiales inéditos para el estudio de la riada del Turia en Valencia (octubre de 1957)'*.
- Snavely, N., 2008. *'Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections'*, unpublished PhD thesis, University of Washington, USA.
- Spetsakis, M.E., Aloimonos, Y., 1991. *'A multi-frame approach to visual motion perception'*. International Journal of Computer Vision 6, 245–255.
- Szeliski, R., Kang, S.B., 1994. *'Recovering 3-D shape and motion from image streams using nonlinear least squares'*. Journal of Visual Communication and Image Representation 5, 10–28.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300-314.*



---

## ANEXO DE PLANOS