



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
CARTOGRÁFICA, GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA

**ANÁLISIS EMPÍRICO DE SOLUCIONES
FOTOGRAMÉTRICAS EN ESTUDIOS DE
EROSIÓN HÍDRICA EN LABORATORIO**

TESIS DOCTORAL

Autora:

Matilde Balaguer Puig

Directores:

Dr. José L. Lerma García
Dra. Sara Ibáñez Asensio
Dr. Ángel Marqués Mateu

Valencia, noviembre de 2015

Universitat Politècnica de València
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y
Fotogrametría



**Análisis empírico de soluciones
fotogramétricas en estudios de erosión
hídrica en laboratorio**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Matilde Balaguer Puig

Dirigida por:

Dr. José Luis Lerma García

Dra. Sara Ibáñez Asensio

Dr. Ángel Marqués Mateu

Valencia, noviembre de 2015

Agradecimientos

A mis directores de tesis, Dr. José Luis Lerma, Dra. Sara Ibáñez y Dr. Ángel Marqués, por sus consejos y ayuda en la realización de esta tesis.

Al Dr. Héctor Moreno y a Javi Roig, de la U. D. de Suelos, por su inestimable ayuda durante la preparación y realización de los experimentos de simulación de lluvia y medición de sedimentos.

A Laura Hernández, jefa de Administración del Departamento, por su apoyo constante y ánimo en esta etapa.

A mis compañeros de equipo del Departamento, por los ánimos recibidos.

A toda mi familia, y especialmente a Ángel, por su confianza en mí.

RESUMEN

La erosión hídrica del suelo es hoy un problema económico y ecológico en todo el mundo. La investigación actual de los procesos que intervienen en la erosión requiere información detallada sobre la topografía de la superficie del suelo con resolución y precisión adecuadas a la escala de trabajo. Una parte de los estudios que se realizan para la modelización y cuantificación de los procesos erosivos se llevan a cabo en laboratorio, a escalas de detalle (milimétricas), y necesitan métodos capaces de proporcionar mediciones precisas de la superficie, de una manera eficiente. Los experimentos realizados en laboratorio para la medición de la erosión hídrica se basan en el uso de simuladores de lluvia sobre parcelas de suelo de reducidas dimensiones. La rugosidad o microrrelieve del suelo influye considerablemente en el reparto de agua de lluvia entre infiltración y escorrentía, y es un parámetro importante para la modelización de procesos erosivos. La medición precisa del relieve de la parcela antes y después de la simulación de la lluvia permite estimar la erosión a partir de las diferencias de volumen.

Así, en los últimos años se ha producido una creciente demanda de datos topográficos de precisión en el ámbito de las ciencias geomorfológicas. La representación de la superficie del suelo se realiza a través de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), generados a partir de datos altimétricos masivos, adquiridos mediante escáneres láser o por técnicas fotogramétricas basadas en imágenes. La obtención de estos datos se ha realizado mediante técnicas fotogramétricas clásicas (entre otras) hasta hace poco; sin embargo, no es una tarea trivial, y además para conseguir las precisiones necesarias se ha de trabajar con una metodología rigurosa que tenga en cuenta todas las fuentes de error en el proceso.

Los avances experimentados en fotogrametría digital y otros ámbitos relacionados, como el procesamiento de imágenes y la visión por computador, han proporcionado nuevas herramientas software disponibles con gran potencial de aplicación en muchas y variadas disciplinas, entre ellas la geomorfología y el estudio de la erosión. El método *Structure from Motion* (SfM) obtiene de forma automática un modelo 3D de un objeto a partir de múltiples imágenes convergentes empleando métodos automáticos de registro imagen a imagen y algoritmos de correspondencia de imágenes, lo que permite un alto

nivel de automatización y una mayor facilidad de uso, con un coste muy bajo.

En esta tesis se pretende establecer una metodología para la obtención de MDE de una zona experimental en laboratorio tras sucesivos episodios de simulación de lluvia mediante técnicas fotogramétricas basadas en SfM. A partir de los MDE obtenidos se realizará una estimación de la erosión aplicando técnicas de diferencias de MDE (DoD), contrastando estas estimaciones con los resultados de los sedimentos arrastrados por la escorrentía y la infiltración para validar el método. Los resultados han demostrado la idoneidad de esta técnica en los estudios de erosión en laboratorio.

PALABRAS CLAVE: Erosión, Fotogrametría, Structure from Motion (SfM), Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), DEM of Difference (DoD), Sistemas de Información Geográfica (SIG), Geomática

SUMMARY

Hydric soil erosion is an economic and ecological problem throughout the world. Current investigation of the processes intervening in the erosion needs detailed information about the soil's surface topography appropriate in resolution and precision for the work's scale. Part of the studies trying to model and quantify the erosive processes are carried out in laboratories, in detailed scales (millimetric), and need methods capable of giving accurate measurements of the surface, in an efficient way. Experiments carried out in a laboratory to measure hydric erosion are based on the use of rain simulators on small soil plots. Soil's rugosity or micro relief influences considerably the distribution of rain water among infiltration and run-off, and is a key factor when modelling erosive processes. Accurate measurement of the plot's relief before and after the rain simulation allows estimation based on the volume differences.

In recent years there is an increasing demand for accurate topographical data in the area of geomorphological science. Reproduction of the soil's surface is done by means of Digital Elevation Models (DEM), generated from massive altimetric data acquired by means of laser scanners or image-based photogrammetric techniques. These data have been collected by means of classical photogrammetric techniques (among others) up until recently; it is not, however, an easy task, and furthermore, to achieve the necessary accuracy, a strict methodology is needed, taking into account all the error sources in the process.

Advances in digital photogrammetry and related fields, such as image processing and computer vision, have brought new software tools with potential application in various fields, such as geomorphology and erosion study. *Structure from Motion* (SfM) method produces automatically a 3D model of an object from multiple converging images, using automatic image to image registry methods and image correspondence algorithms, which allow a great degree of automatization and a greater ease of use, with a very low cost.

This thesis tries to establish a DEM collection methodology of an experimental zone in a laboratory after repeated episodes of simulated rain by means of photogrammetric techniques based on SfM. Based on the obtained DEM, an estimation of the erosion using DEM of Difference (DoD) techniques will be carried out, comparing these estimations

with the results of the obtained run-off and infiltration to validate the method. The results show the suitability of this technique for laboratory erosion studies.

KEY WORDS: Erosion, Photogrammetry, Structure from Motion (SfM), Digital Elevation Models (DEM), DEM of Difference (DoD), Geographical Information Systems (GIS), Geomatics

RESUM

L'erosió hídrica del sòl és actualment un problema econòmic i ecològic en tot el món. La investigació actual dels processos que intervenen en l'erosió requereix informació detallada sobre la topografia de la superfície del sòl amb resolució i precisió adequades a l'escala de treball. Una part dels estudis que es realitzen per a la modelització i quantificació dels processos erosius es duen a terme en laboratori, a escales de detall (mil·limètriques), i necessiten mètodes capaços de proporcionar mesuraments precisos de la superfície, d'una manera eficient. Els experiments realitzats en laboratori per al mesurament de l'erosió hídrica es basen en l'ús de simuladors de pluja sobre parcel·les de sòl de reduïdes dimensions. La rugositat o microrrelleu del sòl influeix considerablement en el repartiment d'aigua de pluja entre infiltració i escolament, i és un paràmetre important per a la modelització de processos erosius. La medició precisa del relleu de la parcel·la abans i després de la simulació de la pluja permet estimar l'erosió a partir de les diferències de volum.

Així, en els últims anys s'ha produït una creixent demanda de dades topogràfiques de precisió en l'àmbit de les ciències geomorfològiques. La representació de la superfície del sòl es realitza a través de Models Digitals d'Elevacions (MDE), generats a partir de dades altimètriques massives, adquirides per mitjà d'escàners làser o per tècniques fotogramètriques basades en imatges. La obtenció d'estes dades s'ha realitzat amb tècniques fotogramètriques clàssiques (entre altres) fins fa poc; no obstant això, no és una tasca trivial, i a més per a aconseguir les precisions necessàries s'ha de treballar amb una metodologia rigorosa que tinga en compte totes les fonts d'error en el procés.

Els avanços experimentats en fotogrametria digital i altres àmbits relacionats, com el processament d'imatges i la visió per computador, han proporcionat noves ferramentes disponibles amb gran potencial d'aplicació en moltes i variades disciplines, entre elles la geomorfologia i l'estudi de l'erosió. El mètode *Structure from Motion* (SfM) obté de forma automàtica un model 3D d'un objecte a partir de múltiples imatges convergents emprant mètodes automàtics de registre imatge a imatge i algorismes de correspondència d'imatges, la qual cosa permet un alt nivell d'automatització i una major facilitat d'ús, amb un cost molt baix.

En esta tesi es pretén establir una metodologia per a l'obtenció de MDE d'una zona experimental en laboratori després de successius episodis de simulació de pluja per mitjà de tècniques fotogramètriques basades en SfM. A partir dels MDE obtinguts es realitzarà una estimació de l'erosió aplicant tècniques de diferències de MDE (DoD), contrastant estes estimacions amb els resultats dels sediments arrossegats per l'escolament i la infiltració per a validar el mètode. Els resultats han demostrat la idoneïtat d'esta tècnica en els estudis d'erosió en laboratori.

PARAULES CLAU: Erosió, Fotogrametria, Structure from Motion (SfM), Models Digitals d'Elevacions (MDE), DEM of Difference (DoD), Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG), Geomàtica

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Contribución de esta tesis	4
1.3	Estructura de la tesis	5
2	Antecedentes	7
2.1	Erosión hídrica del suelo	8
2.2	Geomorfometría y Modelos Digitales de Elevaciones	15
2.3	Fotogrametría en geomorfología	20
3	Metodología	29
3.1	Materiales y métodos	30
3.1.1	Esquema general del procedimiento	30
3.1.2	Materiales	32
3.2	Diseño del experimento de simulación de lluvia	33
3.3	Adquisición de datos	37
3.3.1	Adquisición de imágenes	37
3.3.2	Adquisición de nubes de puntos con escáner láser	45
3.3.3	Recogida de escorrentía e infiltración	50
3.4	Medición de suelo perdido	51
3.4.1	Cálculo de sedimento arrastrado	51
3.4.2	Densidad aparente del suelo	52
3.5	Calibración de la cámara	54
3.6	Generación de Modelos Digitales de Elevaciones	55
3.6.1	Obtención de nubes de puntos con Agisoft PhotoScan	55
3.6.2	Obtención de nubes de puntos con 123D Catch	60
3.6.3	Procesamiento de nubes de puntos láser	62
3.6.4	Obtención de MDE ráster a partir de las nubes de puntos	65

3.7 Comparación nubes de puntos láser y fotogramétricas . . .	72
3.8 Diferencias entre MDE	73
4 Resultados y discusión	79
4.1 Nubes de puntos obtenidas	80
4.2 Orientación absoluta de las nubes de puntos	83
4.3 Distancia entre las nubes de puntos laser y foto	85
4.4 Precisión de los MDE	87
4.5 Cálculo de volumen de cambio a partir de diferencias entre MDE	91
4.6 Cálculo de pérdida de suelo	97
4.7 Análisis de los programas empleados	103
4.8 Propuesta de metodología	106
5 Conclusiones y líneas futuras	109
5.1 Conclusiones obtenidas	109
5.2 Líneas futuras y mejoras	112
Bibliografía	115
Anexos	131
A Cálculo de sedimentos	133
B Establecimiento del sistema de coordenadas local	139
C Calibración de la cámara	145
D Informes Agisoft PhotoScan	151
E Imágenes	201
E.1 Modelos Digitales de Elevaciones	203
E.2 Diferencias entre nubes de puntos láser y foto	209
E.3 Diferencias entre MDE	223

Lista de Figuras

2.1	Concepto de Geomorfometría	19
3.1	Esquema general de las etapas del trabajo	30
3.2	Simulador de lluvia en las instalaciones del Laboratorio de Suelos (UPV)	33
3.3	Equipo regulador de presión	33
3.4	Mesa de simulación	35
3.5	Bandeja de simulación	35
3.6	Muestra inalterada de suelo de la bandeja	36
3.7	Pesado de la muestra	36
3.8	Sombras sobre la superficie de la bandeja en las pruebas	36
3.9	Señales en simulador	36
3.10	Distribución de las imágenes alrededor de la mesa de simulación	43
3.11	HyperFocal: aplicación Android para el cálculo de la profundidad de campo	46
3.12	Leica Cyclone: Escaneo inicial	49
3.13	Adquisición de datos láser	50
3.14	Filtrado del agua de escorrentía	52
3.15	Photoscan: medición de puntos de referencia	58
3.16	PhotoScan: nube de puntos poco densa inicial obtenida en la orientación de las imágenes	58
3.17	Creación de máscaras	59
3.18	PhotoScan: nube de puntos densa con máscaras de imagen	60
3.19	PhotoScan: Malla generada a partir de la nube densa de puntos	60
3.20	123D Catch: modelo 3D obtenido	61

3.21	CloudCompare: Orientación de la nube de puntos láser en el sistema de referencia local	63
3.22	Segmentación de las nubes de puntos	63
3.23	ArcMap: Obtención del error de interpolación del MDE	72
3.24	ArcMap: Herramienta DEM Difference	75
3.25	Ejemplo de informe generado por la herramienta DEM Difference	78
4.1	123DCatch: zona doble (esquina inferior derecha) en la malla generada	82
4.2	Matriz de transformación del sistema de referencia del láser escáner al sistema local	84
4.3	Volumen acumulado de erosión y deposición para distintas frecuencias temporales	93
4.4	Volumen acumulado de erosión y deposición para distintas frecuencias temporales con DoD umbralizados	95
4.5	DoD: Comparación de volumen neto	96
4.6	Volumen neto acumulado calculado de los DoD	97
4.7	Sedimento calculado a partir de los DoD y recogido en la escorrentía	98
4.8	Sedimento acumulado calculado a partir de los DoD y recogido en la escorrentía	99
4.9	Análisis de regresión lineal entre duración de lluvia y sedimento estimado	102
4.10	Análisis de regresión lineal entre sedimento recogido y sedimento determinado mediante DoDs foto umbralizado	102
B.1	Aplicación para el cálculo de coordenadas	144
C.1	Imágenes del patrón de calibración	146
C.2	Esquinas detectadas sobre el patrón de calibración	147
C.3	Agisoft Lens: Informe de calibración de la cámara	147
C.4	Agisoft Lens: Parámetros de calibración de la cámara	148
C.5	Agisoft Lens: Gráfico de distorsión radial del objetivo para $f=18$ mm	148
C.6	Agisoft Lens: Gráfico de distorsión tangencial del objetivo para $f=18$ mm	149
C.7	Fichero XML con los resultados de la calibración de la cámara para $f=18$ mm	149

E.1 MDE obtenidos a partir de imágenes: visualización con sombreado	205
E.2 MDE obtenidos a partir de imágenes	207
E.3 Distancias entre nubes de puntos láser y foto momento 0 .	211
E.4 Distancias entre nubes de puntos láser y foto momento 1 .	213
E.5 Distancias entre nubes de puntos láser y foto momento 2 .	215
E.6 Distancias entre nubes de puntos láser y foto momento 3 .	217
E.7 Distancias entre nubes de puntos láser y foto momento 4 .	219
E.8 Distancias entre nubes de puntos láser y foto momento 5 .	221
E.9 DoD: Diferencias entre MDE	225
E.10 Clasificación DoD sin umbral	227
E.11 Clasificación DoD umbral 1mm	229

Lista de Tablas

3.1	Especificaciones técnicas de la cámara Canon EOS 1100D	42
3.2	Distancias hiperfocales y profundidad de campo de la cámara Canon EOS 1100D para una focal $f=18$ mm	44
3.3	Parámetros de adquisición de las imágenes	45
3.4	Especificaciones técnicas Leica ScanStation2	48
4.1	Características de las nubes de puntos obtenidas	81
4.2	Estadísticos básicos de las distancias entre las nubes de puntos láser y foto	85
4.3	Resultados de la estimación del error de interpolación de los métodos IDW y RBF	88
4.4	Error de interpolación de los MDE	88
4.5	Resultados DoD por categorías	92
4.6	Resultados DoD con umbral 1 mm por categorías	96
4.7	Resultados DoD: sedimento calculado	98
A.1	Cálculo de sedimentos arrastrados por la escorrentía	134
A.2	Cálculo de sedimentos arrastrados por la infiltración	136
A.3	Cálculo de la densidad aparente del suelo de la bandeja	137
A.4	Cálculo de la densidad aparente del suelo de la bandeja tras los episodios de lluvia	137
B.1	Coordenadas puntos de apoyo	144

Capítulo 1

Introducción

Todavía sé poco de cualquier cosa, así que puedo dirigirme hacia donde quiera.

Francis Crick

La erosión del suelo es uno de los problemas ambientales que más preocupan en la actualidad. La erosión hídrica causa pérdidas de suelo por la disgregación de las partículas del suelo por las gotas de lluvia y el arrastre posterior por la escorrentía superficial. Se trata de un proceso natural ocasionado fundamentalmente por las lluvias intensas, aunque factores como la topografía del terreno, el bajo contenido de materia orgánica del suelo, el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, o algunas actividades humanas, como las técnicas de cultivo inapropiadas, las modificaciones de las condiciones hidrológicas, la deforestación y marginalización o abandono de tierras, contribuyen a intensificarlo y acelerarlo. Además puede tener impactos negativos en lugares alejados como la contaminación producida por la acumulación de sedimentos en llanos de inundación o la colmatación de embalses y presas. El área mediterránea está especialmente expuesta a la erosión hídrica cuando se producen fuertes lluvias tras períodos largos de sequía.

El estudio y modelizado de la erosión se basa fundamentalmente en la topografía del terreno para la predicción de la magnitud y dirección de la escorrentía superficial. La cuantificación de los cambios producidos por el proceso erosivo en la superficie topográfica del suelo se realiza

a partir de las descripciones precisas de dicha superficie, mediante Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Otros factores que influyen en los fenómenos de erosión se pueden representar cartográficamente y por tanto la relación con las tecnologías de la información geográfica es obvia. La topografía del terreno, la cobertura vegetal, los usos del suelo, las prácticas culturales y la climatología se representan y almacenan en SIG, con el objetivo de automatizar la aplicación de modelos de erosión.

La obtención de la información altimétrica para los MDE se realiza hoy en día de distintas maneras: mediante fotogrametría, que obtiene las coordenadas de los puntos a partir de imágenes de la superficie, o a partir de sensores activos, como láser o radar, que proporcionan directamente una nube de puntos xyz. La fotogrametría, tanto aérea como terrestre, ha sido utilizada en los estudios geomorfológicos sobre erosión y aplicada a estudios de diversas escalas. Además del método clásico de la fotogrametría estereoscópica, se está empleando fotogrametría convergente, y la variante *Structure from Motion* (SfM) que emplea métodos automáticos de registro imagen a imagen y algoritmos de correspondencia de imágenes, lo que permite un alto nivel de automatización y una mayor facilidad de uso, con un coste muy bajo. El desarrollo de esta metodología se fundamenta en los avances en otros ámbitos como el procesamiento de imágenes y la visión por computador. Se ha aplicado este método para la obtención de MDE en estudios de erosión a escalas medias con buenos resultados, pues es sencillo y rápido, permite utilizar imágenes de todo tipo y ofrece una precisión adecuada.

Sin embargo, una parte de la investigación de la erosión se realiza en laboratorio, en pequeñas parcelas (inferiores a 1 m²) sobre las que se produce lluvia artificial con un simulador de lluvia. Los procesos erosivos así producidos son de una magnitud mucho menor, milimétrica, y se necesitan MDE que sean capaces de representar variaciones de elevación en ese rango. La fotogrametría es una herramienta que proporciona los datos de precisión necesarios, aunque requiere un procedimiento riguroso. La aplicación de la metodología SfM a este tipo de estudios puede facilitar esta tarea, obteniendo resultados de la precisión necesaria.

Los MDE de la superficie del suelo correspondientes a distintos momentos temporales se pueden utilizar para determinar los cambios

experimentados por dicha superficie. Las diferencias de elevación de los puntos de la superficie entre dos instantes permiten obtener la diferencia de volumen ocurrida en ese intervalo. Si la diferencia de volumen es positiva se considera que ha habido deposición de sedimentos; si es negativa, ha habido erosión. De esta forma, si se dispone de las secuencias temporales de MDE que definen la superficie del terreno tras cada episodio de lluvia, se puede obtener la evolución de la erosión en ese período. Además, la realización de estos experimentos en laboratorio empleando simuladores de lluvia y mesas de simulación permite conocer las características de la lluvia aplicada y recoger la escorrentía y los sedimentos arrastrados, y contrastar así estos datos reales con las estimaciones obtenidas a partir de las diferencias de MDE.

Los estudios realizados hasta el momento empleando la fotogrametría SfM se han llevado a cabo en experimentos en campo, sobre zonas de mayor extensión, con buenos resultados. En este trabajo se utilizará la metodología SfM para producir MDE de una parcela experimental de suelo antes y después de una serie de episodios de lluvia producidos con un simulador de lluvia. Se quiere probar la adecuación en este tipo de estudios, y analizar sus ventajas sobre la fotogrametría clásica, más rigurosa en la configuración de imágenes y en la necesidad de puntos de apoyo, o sobre otras tecnologías como el escáner láser, que en este caso se empleará como referencia.

1.1 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es analizar la idoneidad de las aplicaciones fotogramétricas actuales basadas en la metodología *Structure from Motion* en el estudio y cuantificación de la erosión hídrica del suelo a escala de laboratorio en experimentos de simulación de lluvia.

Los objetivos específicos son:

- Establecer una metodología para la obtención de MDE de una zona experimental tras sucesivos episodios de simulación de lluvia mediante técnicas fotogramétricas basadas en SfM.

- Determinar el grado de adecuación de los programas SfM para la obtención de nubes de puntos para la elaboración de MDE de alta precisión.
- Aplicar las técnicas de Diferencias de MDE (DoD) para determinar los cambios de volumen de una superficie.
- Analizar la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos y establecer criterios de significación de las diferencias de elevaciones.
- Estimar las pérdidas de suelo a partir de las variaciones volumétricas, comparando las estimaciones con los resultados reales de erosión medidos durante la simulación de lluvia.
- Realizar un análisis comparativo de las técnicas fotogramétricas empleadas y su adecuación a la modelización de la erosión.

1.2 Contribución de esta tesis

El uso de la Fotogrametría en estudios geomorfológicos ha experimentado cierto desarrollo en los últimos años, contribuyendo a la implantación del término geomorfometría que cada vez es más utilizado en la bibliografía (Pike *et al.*, 2009; Hengl y Reuter, 2008; International Society for Geomorphometry, 2015). En los últimos 10 años se ha presenciado un aumento de publicaciones relacionadas con la aplicación de técnicas fotogramétricas en geomorfología, si bien el uso de las distintas técnicas fotogramétricas y los procedimientos no están estandarizados y el procesamiento de datos difiere entre distintos estudios. Esto es debido sin duda a que la geomorfometría es una disciplina relativamente reciente y todavía es minoritaria en el campo de la geomorfología.

La recopilación de referencias relacionadas con la temática de la tesis muestra que los trabajos sobre erosión en laboratorio a escalas de detalle que emplean fotogrametría utilizan imágenes verticales y fotogrametría estereoscópica. Los trabajos que aplican procedimientos basados en imágenes convergentes y programas SfM se realizan en zonas de campo de mayor extensión, a escalas menores, sin recogida de sedimentos para la cuantificación del suelo perdido. La técnica de DoD se emplea sobre todo en estudios de dinámica fluvial, a nivel de

cuencas, con escalas de trabajo muy distintas a las de las simulaciones de laboratorio. No se han encontrado referencias sobre trabajos que combinen obtención de MDE mediante imágenes convergentes con fotogrametría SfM y obtención de cambios a partir de DoD con la realización de experimentos de laboratorio a escala de detalle con simulación de lluvia y cuantificación de suelo perdido a partir de la escorrentía recogida.

La aportación de esta tesis es la aplicación a la simulación y estudio de erosión hídrica en laboratorio de la metodología de Diferencias de MDE obtenidos mediante fotogrametría SfM con imágenes convergentes, simplificando el proceso de adquisición de imágenes y obtención de MDE, y contrastando los resultados obtenidos con los sedimentos recogidos durante la simulación de lluvia.

1.3 Estructura de la tesis

Se describe en este apartado la estructura general de la tesis.

El Capítulo 1 presenta de forma general la temática en la que se enmarca el trabajo y define los objetivos específicos propuestos.

En el Capítulo 2 se describen los conceptos básicos relacionados con el proceso de erosión hídrica y se lleva a cabo una revisión de los métodos de medida de la erosión existentes. Se describe la relación entre geomorfometría, fotogrametría, MDE y SIG, y su aplicación conjunta en los estudios geomorfológicos actuales. Se realiza una revisión sobre el uso en geomorfología de distintas técnicas fotogramétricas que permiten obtener datos 3D para generar MDE.

El Capítulo 3 describe de forma detallada la metodología seguida en la realización de un experimento de laboratorio con simulaciones de lluvia sobre una parcela de suelo para la obtención de MDE con los que estimar la erosión a partir de las diferencias volumétricas entre los modelos anterior y posterior a la lluvia.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, y se realiza una valoración comparándolos con resultados de trabajos similares.

El capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas y propone mejoras sobre el procedimiento y líneas futuras de investigación.

El anexo A muestra la medida de la densidad aparente del suelo y del sedimento arrastrado por la escorrentía y la infiltración.

El anexo B describe el método seguido para la definición del sistema de referencia local y el cálculo de las coordenadas de los puntos de apoyo empleados.

En el anexo C se describe el proceso de calibración de la cámara y los resultados obtenidos.

El anexo D incluye los informes generados por el programa PhotoScan correspondientes a las nubes de puntos obtenidas.

Por último, el anexo E muestra las imágenes correspondientes a los MDE obtenidos, la comparación de los MDE obtenidos a partir de láser y de imágenes, las diferencias entre MDE sucesivos, y la clasificación de las diferencias en categorías.

Capítulo 2

Antecedentes

Sé breve en tus razonamientos, que ninguno hay gustoso si es largo.

Miguel de Cervantes

En la modelización y cuantificación de los procesos que intervienen en la erosión hídrica del suelo se requiere información detallada sobre la topografía de la superficie del terreno con una adecuada resolución y precisión. Los experimentos realizados en laboratorio para la medición de la erosión hídrica se basan en el uso de simuladores de lluvia sobre una parcela de suelo de reducidas dimensiones. La determinación de la topografía del suelo y la estimación de su variación en cada una de las etapas erosivas se realiza actualmente mediante MDE, obtenidos principalmente mediante fotogrametría y escaneado láser. Además del método clásico de la fotogrametría estereoscópica, se está empleando la variante *Structure from Motion* (SfM) basada en métodos automáticos de registro imagen a imagen y algoritmos de correspondencia de imágenes.

Se presenta en este capítulo una breve descripción de los conceptos básicos relacionados con el proceso de erosión hídrica. Se realizará a continuación una revisión de los métodos de medida de la erosión existentes. Se describen los simuladores de lluvia y su aplicación en estudios de erosión. Se resumen las distintas técnicas fotogramétricas que permiten obtener datos 3D para generar MDE, y se realiza una revisión bibliográfica sobre el uso de la fotogrametría en geomorfología.

2.1 Erosión hídrica del suelo

La erosión del suelo es "un proceso de dos fases que consiste en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos como las corrientes de agua y el viento" (Morgan, 2005). Si los agentes de transporte no poseen suficiente energía para transportar las partículas de suelo se produce una tercera fase de deposición.

Cuando el proceso de desagregación y transporte de las partículas de suelo se produce por acción del agua, se denomina erosión hídrica. Se produce en dos fases concatenadas: disgregación de las partículas y transporte. La disgregación se produce principalmente por la salpicadura causada por el impacto de las gotas de lluvia, y también por meteorización mecánica y bioquímica, prácticas de laboreo y corrientes de agua.

La salpicadura es un proceso esencial en la erosión que desprende fragmentos de suelo y los transporta; suele ser la primera etapa en la pérdida de suelo. Su impacto está en función de la velocidad y tamaño de las gotas (erosividad), y de la resistencia del suelo a su poder erosivo (erosionabilidad). Desde la década de los 70 se realizan estudios sobre la medición de la erosión por salpicadura en laboratorio y en campo. La estimación de forma aislada de la contribución de la erosión por salpicadura en la pérdida de suelo requiere el diseño de dispositivos específicos para la medición de las partículas desplazadas por la salpicadura. Hay varios tipos: bandejas (Ellison, 1944), embudos o botellas insertados en el suelo que recogen el material de la zona circundante que salpica y cae en su interior (Bollinne, 1975; Gorchichko, 1976), y copas de erosión o *splash cups*, con un cilindro central en el que se deposita un bloque de suelo y una bandeja circundante que recoge el material desprendido por salpicadura (Morgan, 1981; Angulo-Martínez *et al.*, 2012). Van Dijk *et al.* (2002b) desarrollan una teoría para la interpretación de experimentos de erosión por salpicadura, describiendo la distribución espacial de las partículas salpicadas desde el punto de impacto de una gota de lluvia como una función exponencial negativa que denominan Función de distribución fundamental de la salpicadura (FSDF), que depende de la tasa de desprendimiento y de la longitud media de desplazamiento o proyección de las partículas. Estudios posteriores han mostrado

resultados que coinciden con esa distribución (Leguédouis *et al.*, 2005), determinando además que la distancia media de proyección está entre 4 y 23 cm en función del tamaño de la partícula y el tipo de suelo. La medición de las distribuciones de tamaño de los fragmentos salpicados muestra que los fragmentos de hasta 2.000 micras son transportados por impactos de gotas de lluvia, y la cantidad de fragmentos salpicados disminuye exponencialmente con la distancia (Legout *et al.*, 2005). Otros autores han estudiado la correlación existente entre un alto porcentaje de gotas grandes en la lluvia y la pérdida de suelo por salpicadura (Abd Elbasit *et al.*, 2011). Una interesante propuesta es el proyecto SoDA (*Soil Degradation Assessment*): un simulador virtual de la degradación de la superficie del suelo causada por la lluvia basado en un autómata celular (Valette *et al.*, 2006b), que emplea algoritmos genéticos difusos (*Genetic Fuzzy Systems*) para la simulación de la erosión por salpicadura (Valette *et al.*, 2006a).

En la erosión hídrica el proceso de transporte de partículas es realizado por el agua. Durante un episodio de precipitación la lluvia que cae al suelo puede almacenarse en pequeñas irregularidades de la superficie o puede infiltrarse en el suelo; la velocidad de infiltración depende de las características del suelo y es determinante en la generación de escorrentía superficial. Cuando la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo o este se satura se inicia el flujo superficial. Tras el encharcamiento y acumulación de agua en la superficie la gravedad hace que el agua se mueva pendiente abajo, con un flujo variable en función de las características del terreno. Se pueden diferenciar varios tipos de erosión causada por el flujo superficial: laminar, con un flujo superficial poco profundo y homogéneo que arrastra las partículas desprendidas y los materiales sueltos; en regueros, en la que el flujo de agua, debido a las irregularidades y rugosidades del terreno, se concentra en corrientes capaces de transportar mayor cantidad de material y forma surcos o regueros; en cárcavas, cuando se profundizan los surcos, formando complejas redes de drenaje. El flujo subsuperficial tiene lugar en el interior del suelo, y puede producirse a través de los poros del suelo o de forma concentrada (Almorox Alonso *et al.*, 2010; Suárez Díaz, 2001).

La cuantificación de la erosión producida se puede realizar por diversos métodos, que pueden clasificarse inicialmente en métodos de evaluación directa, con medición del flujo de agua y sedimentos o de parámetros asociados a los sedimentos o al suelo, y métodos de

evaluación indirecta, basados en modelos de simulación, que pueden ser estadísticos, físicos (e. g. EUROSEM, WEPP) o paramétricos (e.g. USLE, RUSLE). Las herramientas de la Geomática (MDE, SIG, sensores remotos, técnicas de procesamiento de imágenes, etc.) permiten el diseño y aplicación de modelos de erosión cada vez más complejos que contemplan gran número de parámetros (Almorox Alonso *et al.*, 2010).

La descripción precisa de la topografía del suelo y sus cambios durante el proceso erosivo es básica para los estudios de erosión a escalas de detalle. Muchas de las partículas que intervienen en los procesos de erosión del suelo, como las gotas de lluvia, los agregados del suelo y sedimentos, tienen dimensiones características en la escala del milímetro. La modelización y cuantificación de tales procesos requieren información detallada sobre la topografía de la superficie del suelo con la resolución y precisión adecuadas (Rieke-Zapp y Nearing, 2005).

Esta información se puede obtener de diversas maneras: mediante técnicas de contacto con instrumental específico, como la cadena de rodillos o *roller chain* (Saleh, 1993; Merrill *et al.*, 2001) y las agujas de erosión o *pin meter* (Kuipers, 1957; Podmore y Huggins, 1981; Sancho *et al.*, 1991; Paz González y Vidal Vázquez, 2003; García Moreno *et al.*, 2008), y técnicas sin contacto, empleando dispositivos láser lineales específicamente diseñados (*Instantaneous-Profile Laser Scanner*) (Bertuzzi *et al.*, 1990; Darboux y Huang, 2003; Li y Chen, 2012), escáneres láser terrestres (Huang y Bradford, 1992; Haubrock *et al.*, 2009; Afana *et al.*, 2010) y fotogrametría (Collin y Chisholm, 1991; Lane *et al.*, 1993; Butler *et al.*, 1998; Chandler, 1999; Lane *et al.*, 2000; Rieke-Zapp *et al.*, 2001; Lascelles *et al.*, 2002; Rieke-Zapp y Nearing, 2005). Jester y Klik (2005) realizan una exhaustiva comparación de todas estas técnicas de medición (cadena de rodillos, agujas de erosión, escáner láser, estereofotogrametría) sobre una bandeja de suelo de 50 x 55 cm tras un episodio de lluvia simulada de 90 minutos, analizando los siguientes factores: coste de adquisición y tratamiento de los datos, resolución, precisión, capacidad de representación de elementos de la superficie del suelo. Los dispositivos que requieren menor coste y especialización son la cadena y las agujas, que alcanzan precisiones de 5 y 2 mm respectivamente, aunque el tiempo de medición es el más largo, y son más apropiados para mediciones en campo; la mejor resolución y precisión (submilimétrica) la alcanza el escáner láser, con un tiempo de medición relativamente corto, pero requiere un costoso equipo. La estereofotogrametría alcanza

precisiones de 1 mm, y es el método más rápido en la adquisición de los datos, pero el tratamiento posterior es el más costoso en cuanto a tiempo, y necesita personal, hardware y software especializado. Según los autores la fotogrametría es en 2005 una técnica interesante en el ámbito de la medición de la rugosidad del suelo pero necesita desarrollarse más. Es necesario aquí remarcar que en los años transcurridos desde la publicación de este artículo se ha producido un gran avance en las técnicas fotogramétricas, pasando del modelo clásico de fotogrametría estereoscópica a la fotogrametría convergente multi-imagen automatizada.

De la bibliografía referida se puede concluir que los métodos de medición más adecuados para experimentos de laboratorio en zonas de pequeña extensión son el escáner láser y la fotogrametría. El uso de escáner láser está ampliamente extendido y contrastado. Su principal inconveniente es el alto coste del equipo y su rápida obsolescencia, con el constante lanzamiento de nuevos equipos de mejores prestaciones y más operativos. En este escenario, las nuevas técnicas fotogramétricas han despuntado como un método ideal de obtención de datos en estudios sobre erosión, por su bajo coste, facilidad de captura de información, versatilidad, y otras ventajas que se analizarán con detalle en posteriores apartados.

En investigación sobre erosión hídrica se emplean mediciones directas sobre parcelas de erosión en campo o en laboratorio para obtener datos reales que contrastar con los modelos predictivos. La medición en campo, en condiciones naturales de lluvia, permite trabajar a la escala correcta, con características de suelos y cambios temporales en las variables ambientales reales, pero presenta desventajas como largos tiempos de espera necesarios para analizar la evolución, imposibilidad de controlar y aislar variables y parámetros, dificultad para comparar resultados, etc. Debido a estos inconvenientes, generalmente en los experimentos, de campo o de laboratorio, se emplean simuladores de lluvia. La medición en laboratorio permite además un mejor control de las variables consideradas, y ofrece la posibilidad de emplear equipos avanzados y replicar las mediciones (Stroosnijder, 2005).

Los experimentos se diseñan para estudiar la influencia de los distintos factores del modelo analizado, variando alguno de ellos y manteniendo constantes el resto. El correcto diseño de los experimentos es fundamental para la obtención de resultados válidos y su comparación

con otros estudios. Agassi y Bradford (1999) realizan un estudio de las metodologías para estudios de erosión laminar del suelo, revisando los factores más importantes que pueden interferir en la comparación de resultados de estudios similares: las características de la precipitación (simulada o natural), el tipo de goteadores de los simuladores de lluvia, el tipo y tamaño de las parcelas experimentales, y los métodos de preparación del suelo, entre otros.

La medición de la erosión se realiza en las llamadas parcelas de escorrentía, diseñadas específicamente para el estudio de la erosión, de características variables según la escala y tipo de estudio. Según el tamaño se pueden clasificar en parcelas grandes (50 m² o más), pequeñas (entre 2 m² y 10 m²) o microparcels (desde 0,25 m² hasta unos 2 m²) (Ibáñez Asensio, 2001). Mediante distintos tipos de colectores se recoge la escorrentía y los sedimentos para su posterior medición. Boix-Fayos *et al.* (2006) estudian las ventajas y limitaciones del uso de parcelas de campo para medir la erosión del suelo y las posibles fuentes de variación en los resultados obtenidos.

Las experiencias realizadas en laboratorio utilizan simuladores de lluvia y las denominadas mesas de simulación, que básicamente son bandejas o soportes que se llenan con muestras de suelo alterado bajo unas condiciones específicas de trabajo. Estas mesas de simulación están diseñadas para reproducir condiciones de drenaje libre; disponen de un sistema de recolección de la infiltración y del material erosionado por escorrentía, y permiten variar la pendiente del terreno (Ibáñez Asensio *et al.*, 2012).

Los simuladores de lluvia son dispositivos desarrollados para reproducir las características de la precipitación pluvial lo más fielmente posible, reproduciendo tanto la distribución del tamaño de las gotas como su energía cinética de impacto. Se emplean en el estudio de las relaciones lluvia-escorrentía, la medida de la tasa de infiltración y la estimación de las pérdidas de suelo. Una de sus principales ventajas es poder prescindir de la lluvia natural, lo que permite programar y realizar gran número de experiencias en muy poco tiempo (Ibáñez Asensio *et al.*, 2012).

Según Sánchez Cohen y Asseline (1999), las características deseables en un simulador son las siguientes:

- Distribución del tamaño de gota cercana a la real.

- Velocidades de impacto cercanas a aquellas de las gotas de lluvia naturales.
- Intensidades en el rango de lluvia conocidas para la región de estudio.
- Tamaño de la parcela experimental suficiente para que represente las condiciones a evaluar.
- Uniformidad de las características de gota y la intensidad de aplicación sobre el área de estudio.
- Aplicación de gotas casi continua sobre el área.
- Ángulo de impacto cercano a la vertical.
- Capacidad de reproducir la duración de la precipitación de interés a la intensidad deseada.
- Portabilidad, que permita su uso en campo.
- Robustez en el uso en condiciones naturales tales como altas temperaturas y velocidades de viento moderadas.

Así el diseño de un simulador de lluvia plantea dos grandes retos: replicar lo mejor posible de las características físicas de la lluvia natural, y producir un dispositivo que coincida con la escala del proceso de interés y los recursos disponibles. Cerdà (1999), Sánchez Cohen y Asseline (1999), Parsons y Lascelles (2000), Grismer (2011), Ries *et al.* (2013) y Iserloh *et al.* (2013) ofrecen una completa visión de los distintos tipos de simuladores y su evolución. Cabe reseñar que la mayoría de los simuladores son diseñados y construidos por los propios investigadores para adaptarlos a los objetivos de sus investigaciones y estudios; Calvo *et al.* (1988), Cerdà *et al.* (1997), Benito *et al.* (2001), Humphry *et al.* (2002), Pérez *et al.* (2003), Covert y Jordan (2009), Iserloh *et al.* (2012) son solo algunos ejemplos. Actualmente se comercializan también sofisticados y costosos equipos (Edibon, 2015; Discover Armfield, 2015) que cumplen todos los requisitos. No obstante, el diseño y fabricación de instrumentos experimentales como los simuladores, incluso con muy escasos recursos, contribuye decisivamente a la comprensión de los procesos modelizados y al desarrollo de la creatividad para buscar soluciones, como demuestran Centeno *et al.* (2006) en su experiencia con el diseño y fabricación por estudiantes universitarios de un simulador de erosión por escorrentía superficial y por impacto de las gotas de lluvia.

En general los simuladores de lluvia se pueden clasificar en dos tipos en función del mecanismo generador de las gotas: goteadores, en los que las gotas de lluvia se precipitan de forma natural, sin velocidad a la salida, y pulverizadores, en los que se generan gotas mediante el paso de agua a presión por las boquillas.

Los simuladores goteadores generan gotas iguales de forma individual, de diferente diámetro en función del dispositivo de salida empleado (tubos finos de vidrio o polietileno, agujas hipodérmicas), y las dejan caer desde una cierta altura, impactando siempre en el mismo lugar. Se pueden controlar las características de las lluvias artificiales generadas variando parámetros como la separación y diámetro de las agujas o la presión del agua. En la lluvia natural el impacto de las gotas no se produce siempre en el mismo punto, sino que presenta un comportamiento estocástico; para conseguir esta característica en la lluvia artificial se ha recurrido a simuladores con movimiento continuo o a la colocación de mallas móviles bajo las agujas del simulador.

Los simuladores pulverizadores o de boquilla lanzan agua a presión por boquillas de riego (generalmente) que producen gotas de distintos tamaños, más parecidas a las de la lluvia natural.

La caracterización de los simuladores se realiza en base a la distribución de los tamaños de gota generados, la energía cinética de cada intervalo de tamaños de gota, la intensidad de la lluvia y la uniformidad. La energía cinética es función de la masa de la gota de agua y de su velocidad terminal (Van Dijk *et al.*, 2002a), y por tanto de la altura de caída.

Los simuladores goteadores presentan una desventaja: puesto que las gotas inician su caída con velocidad cero, los goteadores deberán estar localizados a una altura suficiente del suelo para que el impacto sea similar al de la velocidad real de la lluvia. Resultados experimentales han demostrado que gotas de radio superior a 1 mm necesitan al menos 12 metros de altura para acelerar hasta la velocidad terminal (Wang y Pruppacher, 1977). Sin embargo el manejo de simuladores de tales dimensiones en campo no es sencillo, y ni siquiera en instalaciones de laboratorio es habitual. Como excepción cabe destacar el simulador de lluvia de laboratorio de 12 m de altura del *Arid Land Research Center* (Tottori University, Japón) (Abd Elbasit *et al.*, 2008; Moritani *et al.*, 2011; Abd Elbasit *et al.*, 2011). En los simuladores pulverizadores las gotas inician su caída

con una determinada velocidad inicial dada por la presión de salida, y además las gotas obtenidas son más pequeñas. La altura necesaria para alcanzar la velocidad terminal disminuye con la disminución del tamaño de la gota, de tal manera que las gotas de menor tamaño alcanzan velocidades terminales en tan solo unos pocos metros de caída (Grismer, 2011). Así, para obtener velocidades iguales a la velocidad terminal de las gotas se ha de combinar la altura de caída y la presión de salida de la boquilla adecuadas para cada tamaño de gota (Humphry *et al.*, 2002). En la práctica los simuladores utilizados habitualmente, tanto de campo como de laboratorio, presentan alturas entre 2 y 6 m (Calvo *et al.*, 1988; Lascelles *et al.*, 2002; Pérez *et al.*, 2003; Rieke-Zapp y Nearing, 2005; Berger *et al.*, 2010; Grismer, 2011), con algunas excepciones como el simulador de campo de 11 m de altura de Munster *et al.* (2006).

Los métodos y experimentos descritos están orientados a la obtención de datos sobre erosión a través de la medición directa. Sin embargo, existen otras formas indirectas de estudio de los cambios producidos por la erosión, mediante la generación de superficies matemáticas que representen la elevación del terreno: los Modelos Digitales de Elevaciones.

Se describe a continuación el marco conceptual en el que se ubican este tipo de estudios.

2.2 Geomorfometría y Modelos Digitales de Elevaciones

La representación de la superficie del terreno es el principal objetivo de la cartografía. Hasta no hace mucho, el modelo de elevaciones de la superficie que permitía realizar cálculos y obtener parámetros derivados como la pendiente era el modelo de curvas de nivel. La idea de obtener una representación matemática de la superficie del terreno que permita un análisis cuantitativo surge a partir de los grandes avances matemáticos de finales del siglo XVIII (Pike *et al.*, 2009), pero es a mediados del siglo XX cuando empieza a desarrollarse plenamente, recibiendo el nombre de Geomorfometría: "El fin perseguido en Geomorfometría es obtener por métodos matemáticos

la expresión integral de la topografía de un ámbito geográfico determinado” (Rosso de Luna, 1965). Los estudios geomorfométricos se basaban en técnicas estadísticas aplicadas sobre datos numéricos del terreno obtenidos inicialmente a partir de la cartografía analógica existente, con las evidentes limitaciones de la poca capacidad de cálculo y la escala de los datos. El desarrollo de los ordenadores electrónicos en la década de 1950 fue fundamental en el progreso de la geomorfometría.

Al mismo tiempo, este avance tecnológico había propiciado un salto cualitativo en otra disciplina relacionada con la obtención de información sobre la superficie del terreno: la Fotogrametría. Surgida a finales del siglo XIX, la Fotogrametría es “la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones fiables por medio de fotografías para obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotografiado” (ASPRS, 2004). Basada hasta ese momento en instrumentos óptico-mecánicos que reconstruyen la geometría de un par estereoscópico de fotografías (Fotogrametría Analógica), la incorporación de los ordenadores permitió definir la geometría estereoscópica mediante modelos matemáticos, ampliando las posibilidades de trabajo a un rango de imágenes mucho mayor. La Fotogrametría Analítica, como se suele denominar a esta etapa, experimentó un gran desarrollo en la segunda mitad del siglo XX, siguiendo a los avances en informática, hasta la etapa actual, llamada Fotogrametría Digital, en plena expansión.

La confluencia de estas circunstancias llevaron al desarrollo de otro concepto fundamental: el Modelo Digital del Terreno. Miller y Laflamme, del *Photogrammetry Laboratory of Massachusetts Institute of Technology*, publican en 1958 *The Digital Terrain Model - Theory and Applications*, donde definen el nuevo concepto de Modelo Digital del Terreno:

“The Digital Terrain Model (DTM) is simply a statistical representation of the continuous surface of the ground by a large number of selected points with known xyz coordinates in an arbitrary coordinate field. Storing the DTM data on computer input material makes it available to the computer for an analysis of a wide variety of terrain problems, and also for the evaluation of an unlimited number of independent solutions to each type of problem.”

Los Modelos Digitales del Terreno (MDT) o Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) permiten pasar de un conjunto de puntos xyz individuales del terreno a una superficie continua que proporciona el valor de z en cualquier posición planimétrica. Esta nueva representación de la superficie del terreno es el instrumento que necesitaba la geomorfometría para la aplicación de las técnicas de análisis geométrico y estadístico que permitan obtener todo tipo de parámetros y datos derivados.

Se define así la Geomorfometría como "la ciencia del análisis cuantitativo de la superficie del terreno a partir de Modelos Digitales de Elevaciones, enfocada a la extracción de parámetros y objetos" (International Society for Geomorphometry, 2015).

Un factor clave para el auge actual de esta disciplina ha sido la disponibilidad de datos. Si bien la fotogrametría era capaz de proporcionar información altimétrica masiva y de calidad, hasta finales del siglo XX seguía siendo un procedimiento costoso, en tiempo, dinero y personal especializado, y centrado en escalas medias y pequeñas. Las cámaras digitales, tanto en plataformas aerotransportadas (cada vez más versátiles) como sobre la superficie, junto con los desarrollos en procesamiento de imágenes digitales, permiten hoy la obtención de una cantidad ingente de información altimétrica con un coste mucho menor. Hay otra tecnología que ha proporcionado datos altimétricos de forma rápida y eficiente: los sensores activos como el láser y el rádar. Su progresiva evolución ha producido instrumentos que permiten la adquisición de nubes de puntos xyz en todos los rangos de distancias, desde submilimétrico (escáneres industriales), decenas o cientos de metros (escáneres láser terrestres, aerotransportados o Lidar) a kilómetros (sensores rádar a bordo de satélites).

Se dispone así de instrumentos y técnicas para la obtención de grandes cantidades de datos de la superficie del terreno, con los que se generan MDE que representan dicha superficie y permiten extraer parámetros derivados, como pendiente, orientación o rugosidad. La última pieza que falta es un sistema que integre toda la información y proporcione herramientas para operar sobre los MDE, combinando los resultados con otros datos espaciales, y visualizándolos para obtener mapas y otras representaciones: los Sistemas de Información Geográfica. El concepto fundamental de los SIG es el análisis de datos espaciales temáticos y la creación de una base de datos espacial del

territorio. De nuevo son conceptos existentes y aplicados desde hace tiempo, que tuvieron que esperar al desarrollo de la informática para convertirse a partir de la década de 1980 en una herramienta básica en cualquier disciplina que trabaje con datos espaciales. Una definición ampliamente aceptada de SIG es la que realizan Burrough y McDonnell (1998): "Conjunto de herramientas destinadas a recolectar, almacenar, recuperar, transformar y representar datos espaciales procedentes del mundo real". Los SIG han ido desarrollándose tecnológicamente y conceptualmente, pasando de ser una herramienta al servicio de otras ciencias a considerarse hoy en día una ciencia en sí misma: las siglas GIS ya no solo significan *Geographic Information System* sino también *Geographic Information Science* (Goodchild, 2010).

Todo este conjunto de ciencias y tecnologías relacionadas con la información digital geoespacial o localizada dan lugar a la Geomática ya en el siglo XXI. La Geomática es la disciplina que engloba las geociencias con la integración y aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Esta suma de geociencias más TIC hace posible la captura, procesamiento, análisis, interpretación, almacenamiento, modelización, aplicación y difusión de información digital geoespacial o localizada, aplicable en los ámbitos de la ingeniería, el territorio y la sociedad (GeomáticaES, 2015). La fotogrametría, los MDE y los SIG descritos quedan dentro del ámbito de la geomática, que proporciona un marco conceptual riguroso para su uso.

Así pues, la Geomorfometría es una ciencia aplicada que utiliza métodos de análisis y obtención de datos propios de unas disciplinas (Matemáticas y Geomática) para resolver cuestiones relacionadas con la superficie del terreno planteadas por otras (Ciencias de la Tierra). La Figura 2.1 representa estas relaciones entre distintas disciplinas.

Este es el escenario en el que se ubican actualmente los estudios de la erosión, con estudios y equipos multidisciplinares que reflejan esta confluencia.

Tal como se ha comentado, los MDE son un elemento fundamental en el estudio de la superficie del terreno; proporcionan la información necesaria sobre la superficie en estudios de diversos tipos, permiten el cálculo de gran número de parámetros derivados como pendiente, longitud de pendiente, índices de rugosidad, etc., y posibilitan la realización de simulaciones numéricas. Wilson (2012) realiza una

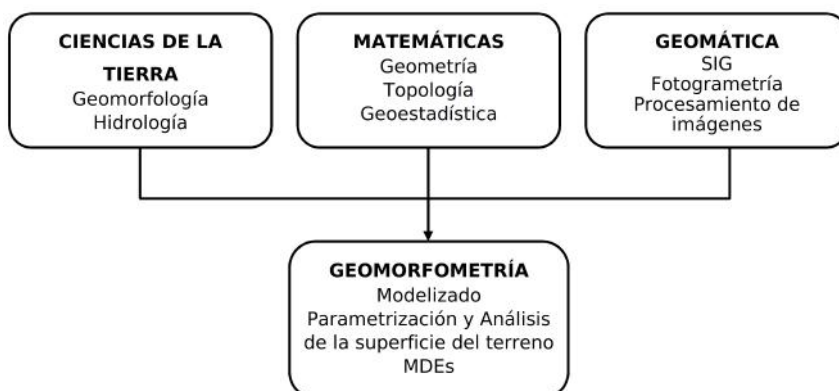


Figura 2.1: Concepto de Geomorfometría (adaptado de Pike *et al.* 2009)

revisión de la evolución en los últimos 25 años y el estado actual de los métodos y fuentes de datos empleados habitualmente para la creación de MDE. Existe un gran número de referencias bibliográficas sobre los MDE y sus aplicaciones; por ejemplo, Pike (2002) recoge más de 1600 referencias de trabajos en el ámbito de la geomorfometría. El número actual de referencias es mucho mayor. El presente trabajo se centra en el uso actual de los MDE para el estudio de la erosión hídrica y la obtención de los datos necesarios para su elaboración.

Los estudios más actuales sobre cambios en la superficie del suelo y erosión se basan en la técnica de diferencias de MDE. La estimación del cambio en la superficie se mide a partir de las diferencias de elevaciones entre MDE secuenciales de la zona; posteriormente estos cambios se cuantifican en término de erosión. Una completa descripción del origen y desarrollo de esta técnica, referida como DoD (*DEM of Difference*), se puede encontrar en Wheaton (2008). Algunos trabajos de autores que aplican esta metodología son Betts y DeRose (1999); Lane *et al.* (2003); Martínez-Casasnovas (2003); Aguilar *et al.* (2005); Abd Elbasit *et al.* (2009); Marzloff y Poesen (2009); Gessesse *et al.* (2010); Wheaton *et al.* (2010); Williams (2012) (no se pretende ofrecer un listado exhaustivo, sino proporcionar algunos ejemplos que ilustren este procedimiento). Se trata de una técnica ampliamente aceptada y aplicada hoy en día.

Este método se basa en las diferencias entre MDE de la superficie de estudio, y por tanto un aspecto fundamental es la obtención de dichos MDE. Como se ha visto antes, existen varias posibilidades para la captura de la información espacial con la que elaborar los modelos. En esta tesis se pretende realizar un análisis de las técnicas fotogramétricas actuales como método de obtención de información espacial para el estudio de erosión a nivel de detalle, de modo que se muestra a continuación una descripción del uso de la fotogrametría en el ámbito de la geomorfología y los estudios de erosión.

2.3 Fotogrametría en geomorfología

La fotogrametría engloba métodos de medición e interpretación de imágenes con el objetivo de derivar la forma y localización de un objeto a partir de una o más fotografías de dicho objeto (Kraus, 2007). El propósito principal de la medición fotogramétrica es la reconstrucción tridimensional de un objeto en forma digital (coordenadas y elementos geométricos derivados) o forma gráfica (imágenes, dibujos, mapas) (Luhmann *et al.*, 2006). Para ello la fotogrametría establece de forma rigurosa las relaciones geométricas que existen entre la imagen y el objeto. Si estas relaciones están definidas correctamente entonces se puede obtener información sobre el objeto a partir únicamente de sus imágenes (Mikhail *et al.*, 2001).

El proceso fotogramétrico se puede estructurar en tres etapas: adquisición de imágenes, interpretación y medición de imágenes, y reconstrucción del objeto. La adquisición de imágenes es una etapa fundamental en el proceso fotogramétrico. Además es necesario describir y modelizar el proceso de creación de la imagen para poder obtener resultados precisos y fiables: fuentes de luz, propiedades de la superficie del objeto, medio recorrido por la luz, tecnología del sensor y de la cámara, procesamiento de la imagen, y otros procesos. La interpretación y medición de imágenes consiste en identificar la imagen de un punto del objeto, a partir de su forma, brillo, color u otras características, y establecer su posición dentro de la imagen. Para cada punto imagen se obtienen un conjunto de datos geométricos y radiométricos. A partir de los datos obtenidos en la medición de las imágenes se puede realizar la modelización y reconstrucción

tridimensional del objeto, estableciendo y aplicando las pertinentes transformaciones matemáticas entre espacio imagen y espacio objeto (Lerma, 2002).

La aplicación de técnicas fotogramétricas en el ámbito geomorfológico para obtener información espacial ha seguido el ritmo de la evolución tecnológica experimentada. Se describen a continuación las distintas etapas en que se puede estructurar el uso de fotogrametría en estudios geomorfológicos, centrando la atención sobre todo en trabajos similares al propuesto en esta tesis: estudios de erosión a partir de MDE producidos por técnicas fotogramétricas, de zonas de muy pequeña extensión, con gran nivel de detalle, en parcelas experimentales sometidas a episodios de lluvia artificial generadas mediante un simulador de lluvia en laboratorio.

En geomorfología se ha empleado la fotografía durante mucho tiempo para la interpretación cualitativa de la información; la fotogrametría estereoscópica ha sido una herramienta con gran potencial para los estudios geomorfológicos (Welch y Dijkers, 1978; Collin y Chisholm, 1991; Lane *et al.*, 1993). La evolución de la fotogrametría de la etapa analógica a la analítica, en la década de 1960, supuso un gran cambio en la metodología empleada hasta ese momento para la adquisición de la información necesaria para la representación precisa de la topografía del terreno y la obtención de modelos de elevación (Lane *et al.*, 2000). En la década de los 90 se empiezan a aplicar nuevos métodos en la investigación geomorfológica, aprovechando las nuevas tecnologías de modelización de la superficie terrestre (láser terrestre, LIDAR, teledetección, GPS, fotogrametría digital) y el desarrollo de la informática, con un espectacular aumento de la capacidad de cálculo y la aparición de los ordenadores personales (Church, 2010). Esto abre un nuevo escenario para la geomorfología, con la integración de estas herramientas y técnicas en los procesos de adquisición y manipulación de información tridimensional, tal como se ha visto en el anterior apartado.

Chandler (1999) resume las grandes ventajas que ofrece la fotogrametría digital en ese momento en comparación con los métodos de fotogrametría clásica y otras técnicas de levantamiento topográfico: producción de MDE densos mediante algoritmos de procesamiento de imágenes totalmente automatizados, sin necesidad de medir directamente las líneas de ruptura del terreno; software fotogramétrico

disponible comercialmente a precios asequibles y diseñado para un amplio mercado incluyendo usuarios no especializados en fotogrametría; uso de plataformas hardware estándar (estaciones de trabajo basadas en Unix, PCs) en lugar de estaciones fotogramétricas especializadas y caras. El autor destaca que sigue siendo necesaria una mínima experiencia y comprensión del procedimiento para obtener buenos resultados, y presenta una serie de recomendaciones que permitan a usuarios inexpertos evitar los problemas más típicos en las etapas habituales del trabajo: definición de la calidad requerida del MDE, selección y calibración de la cámara, planificación de la toma de imágenes y puntos de apoyo, procesamiento de los datos. En ISPRS (2010) podemos encontrar una lista actualizada de consejos para un uso efectivo de la fotogrametría digital en el ámbito de las ciencias de la tierra que sintetiza la experiencia de los investigadores en el uso de estas tecnologías en la última década.

La efectividad de la fotogrametría estereoscópica en trabajos de escala media a partir de imágenes verticales aéreas de zonas de gran extensión está ampliamente demostrada, y se ha empleado en gran número de estudios geomorfológicos a nivel de cuenca; sin embargo gran parte de la investigación en geomorfología se enfoca al estudio de la microtopografía del suelo de zonas de pequeña extensión empleando fotogrametría. Es en este ámbito en el que se centra esta tesis, y se realiza a continuación una revisión del estado actual de las investigaciones.

Diversos autores analizan la capacidad de la fotogrametría digital como herramienta para la generación de datos topográficos y MDE a distintas escalas. Las primeras experiencias para generar MDE de parcelas de suelo de pequeñas dimensiones (sobre las que se emplean simuladores de lluvia en algunos casos) se llevan a cabo utilizando pares estereoscópicos de imágenes verticales obtenidas con cámaras digitales comerciales y software de fotogrametría aérea estereoscópica convencional. Lascelles *et al.* (2002) emplean un solo par estereoscópico de imágenes verticales para generar los MDE correspondientes a una superficie de suelo de 4 x 1,75 m antes y después de aplicar una lluvia simulada, con resultados que consideran alentadores. Rieke-Zapp y Nearing (2005) emplean fotogrametría estereoscópica sobre una parcela de suelo de 4 x 4 m sometida a lluvia simulada y calculan las diferencias entre MDE sucesivos como indicador del volumen de suelo perdido, comparando los resultados

con el volumen de sedimentos recogidos durante el experimento. Gessesse *et al.* (2010) realizan un experimento similar sobre una parcela de suelo en campo con lluvia natural. Algunos trabajos comparan los resultados de la fotogrametría con los de escáneres láser, o con instrumental específico de medida de erosión. Rieke-Zapp *et al.* (2001) realizan MDE de la superficie de suelo de un simulador de escorrentía superficial de laboratorio de unos 4 x 2 m mediante escáner láser lineal y a partir de pares de fotografías estereoscópicas; según los autores, la fotogrametría ofrece unos resultados de precisión relativa superior a la del láser escáner. Abd Elbasit *et al.* (2009) generan MDE de una superficie patrón de 30 x 30 cm, mediante fotogrametría estereoscópica y software propio, y a partir de la medición de la superficie mediante un *pin-meter*; los resultados muestran una buena correlación entre ambos, y se destaca el gran potencial de la fotogrametría con cámaras convencionales frente al uso de instrumental específico. Nouwakpo *et al.* (2010) comparan MDE de una zona de 2 x 2 m obtenidos mediante imágenes estereoscópicas y con un láser lineal (Instantaneous-Profile Laser Scanner) de alta precisión, con resultados equiparables.

En todos estos trabajos se emplea fotogrametría estereoscópica clásica para la obtención de los datos 3D, pero, aunque los resultados son en general positivos, se presentan una serie de inconvenientes: el software está diseñado para fotogramas aéreos, con bloques de imágenes verticales con gran solape; sin embargo es complicado obtener imágenes verticales de las parcelas de suelo estudiadas, pues se necesita colocar la cámara a la altura necesaria sobre el suelo en algún tipo de soporte, ya sea fijo (Lascelles *et al.*, 2002; Abd Elbasit *et al.*, 2009), o bien un raíl horizontal que permita ir desplazando la cámara en función del solape deseado (Rieke-Zapp *et al.*, 2001; Rieke-Zapp y Nearing, 2005; Nouwakpo *et al.*, 2010), limitando mucho la posibilidad de realizar experimentos en campo. Otros aspectos negativos son la obligatoriedad de emplear puntos de apoyo de coordenadas conocidas para realizar el ajuste del bloque de imágenes, la necesidad de conocer los parámetros de calibración de las cámaras empleadas, y en general la rigidez de estos programas fotogramétricos, diseñados para bloques de imágenes con una configuración estándar.

En algunos estudios se aplica la metodología de la fotogrametría terrestre de objeto cercano (*Close Range Photogrammetry, CRP*), que emplea múltiples imágenes convergentes (Luhmann *et al.*, 2013). Heng

et al. (2010) realizan una comparación entre MDE antes y después de una simulación de lluvia, obtenidos con láser escáner y con un par de imágenes convergentes tomadas desde posiciones fijas, y analizan los efectos de las imprecisiones en el modelo de cámara empleado y la geometría de la toma de las imágenes. (Moritani *et al.*, 2011) utilizan un planteamiento similar para sus experimentos en un simulador de lluvia y viento: imágenes convergentes en posiciones fijas y conocidas.

Se empieza a aplicar en este momento en fotogrametría un método de modelización 3D que combina dos procesos, *Structure from Motion* (SfM) y Modelado Basado en Imágenes (*Image-Based Modeling*), producto de los avances en los ámbitos de la visión por computador y el procesamiento de imágenes. Este nuevo enfoque permite resolver simultáneamente y de forma automática las orientaciones de las cámaras y la geometría de la escena, sin necesidad de puntos de apoyo, a partir de elementos extraídos automáticamente de un conjunto de imágenes superpuestas (Westoby *et al.*, 2012). Este método se popularizó a partir del algoritmo *Photo Tourism* (Snavely, 2008; Snavely *et al.*, 2008) creado para la obtención de modelos 3D de edificios y monumentos a partir de imágenes disponibles en Internet, empleando SfM; la aplicación web Microsoft Photosynth (Photosynth, 2015) se basa en este trabajo.

El término *Structure from Motion* (Ullman, 1979) designa un problema central en visión por computador: obtener la posición y orientación de las cámaras y las coordenadas de los puntos 3D de la escena a partir de una secuencia de al menos dos imágenes. Se basa en los conceptos de la geometría proyectiva epipolar de un par de imágenes (Szeliski, 2010): a partir de correspondencias o puntos homólogos entre las imágenes se obtiene la orientación de las mismas, mediante el cálculo de la matriz fundamental, y se reconstruye la escena obteniendo las coordenadas 3D de los puntos por triangulación a partir de los puntos imagen (Pears *et al.*, 2012). La obtención de los puntos homólogos y sus correspondencias se realiza mediante algoritmos automáticos de detección y correspondencia de puntos, desarrollados a partir de la década de 1980 (Förstner, 1986; Harris y Stephens, 1988; Lowe, 1999).

El método SfM utiliza algoritmos de detección de elementos para identificar en las imágenes iniciales elementos o puntos de interés invariantes a cambios de escala y rotaciones; a continuación estos puntos extraídos en cada imagen individual son emparejados

adecuadamente por un algoritmo de correspondencia, determinando los conjuntos de puntos homólogos (es decir, los puntos imagen en varias fotos de un mismo punto objeto). El procedimiento determina los elementos existentes entre cada par de imágenes, y calcula las correspondientes matrices de orientación. En función de estos resultados, se elige el mejor par de imágenes como imágenes iniciales de la reconstrucción 3D de la escena, y se calcula un ajuste de haces al que se van añadiendo iterativamente las imágenes para optimizar los parámetros y obtener la nube de puntos (Yang *et al.*, 2013), en un sistema de coordenadas arbitrario. Posteriormente se puede aplicar un escalado o una transformación de semejanza tridimensional a los puntos obtenidos para pasar a un sistema de referencia local determinado, si es necesario; bastará con medir una distancia objeto, o conocer las coordenadas de tres puntos de referencia.

Este procedimiento presenta algunas diferencias fundamentales con respecto a la fotogrametría digital convencional. En esta las imágenes se adquieren siguiendo una estructura de imágenes superpuestas por pasadas paralelas; los puntos homólogos en dos imágenes consecutivas estarán en la zona de solape de las imágenes, y por tanto se puede estimar la posición inicial aproximada para su búsqueda; un algoritmo de correspondencia basada en intensidades (por ejemplo correlación cruzada) recorre esa ventana de búsqueda, analizando los cambios de valor de los pixels en un vecindario reducido para identificar puntos homólogos. Este método es muy sensible a diferencias de escala, posición o iluminación de las imágenes. En cambio, SfM utiliza algoritmos de detección de elementos que son invariantes a esos cambios. Los elementos de una imagen son patrones que se diferencian de su vecindad inmediata; su identificación no se realiza directamente con los valores de intensidad de los pixels de la imagen, sino a partir de funciones basadas en gradientes de la intensidad en múltiples escalas. Se construye para cada elemento encontrado un descriptor basado en las magnitudes y orientaciones del gradiente de intensidad de cada pixel. La correspondencia entre elementos se realiza a partir de las distancias entre descriptores; uno de los algoritmos descriptores de elementos más utilizado es SIFT (Lowe, 2004), basado en las diferencias de Gaussianas de la imagen. Así, al extraer las características del elemento y trabajar con sus descriptores en lugar de utilizar directamente los valores de intensidad, se puede reconocer un mismo punto en imágenes que presenten distintas

orientaciones, distintas escalas o variaciones en la iluminación, en función del algoritmo de detección empleado. Esto proporciona una gran flexibilidad en la adquisición de imágenes: se pueden tomar imágenes desde distintas distancias al objeto (imágenes a distintas escalas), con cualquier rotación de la cámara, empleando distintos niveles de zoom (imágenes con distinta focal) o incluso distintas cámaras; el único requisito es que cada punto del objeto debe aparecer en múltiples imágenes, es decir, se deben tomar múltiples imágenes altamente redundantes del objeto (típicamente una adquisición de imágenes en anillo rodeando el objeto de interés). El número de elementos encontrados en una imagen dependerá principalmente de la resolución y nitidez de la imagen, de la distancia al objeto y de la textura de este (Westoby *et al.*, 2012).

El conjunto de puntos 3D así determinados se denomina nube dispersa de puntos; son suficientes para obtener la orientación de las imágenes, pero en general no bastan para una reconstrucción precisa del objeto. Se realiza entonces una densificación de la nube mediante algoritmos *Multi-View Stereo*. Para cada par de imágenes formados a partir del conjunto de imágenes orientadas se obtiene una imagen de disparidad, que es una imagen sintética que representa la disparidad calculada para cada pixel; la disparidad es la distancia horizontal entre píxeles correspondientes en las imágenes (concepto equivalente al de paralaje en fotogrametría), y es inversamente proporcional a la profundidad del punto en el espacio objeto. Esta disparidad permite calcular la profundidad de cada pixel aplicando las fórmulas de la geometría estereoscópica. Se obtiene así un valor de profundidad o z para cada pixel de la imagen, y una nube de puntos muy densa que representa la geometría del objeto (Szeliski, 2010).

Actualmente existen diversas aplicaciones basadas en SfM y MVS para la modelización 3D a partir de imágenes; se enumeran algunas de ellas a continuación:

- Aplicaciones web: AutoDesk 123DCatch (AutoDesk, 2015), Microsoft Photosynth (Photosynth, 2015).
- Programas comerciales: PhotoScan (Agisoft, 2014), PhotoModeler Scanner (EOS System Inc., 2015).

- Software libre VisualSfM (Wu, 2015), SfMToolkit (SfMToolkit, 2015), APERO y MICMAC (Deseilligny y Clery, 2011), Python Photogrammetry Toolbox (Moulon y Bezzi, 2011).

Westoby *et al.* (2012) analizan esta tecnología desde el punto de vista de su aplicación a las ciencias del terreno, y concluyen que es una alternativa adecuada para la modelización del terreno a microescalas y escalas medias. Fonstad *et al.* (2013) realizan una detallada descripción del método y lo aplican a imágenes aéreas de baja altitud, obteniendo resultados comparables al Lidar.

Otros estudios han aplicado la metodología SfM a distintas escalas (James y Robson, 2012; Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2014a), en parcelas pequeñas para el cálculo de parámetros de rugosidad del terreno (Bretar *et al.*, 2013; Snapir *et al.*, 2014) o en laboratorio (Nouwakpo *et al.*, 2014).

Estos trabajos demuestran la utilidad de los métodos fotogramétricos basados en SfM para estudios geomorfológicos a escalas medias y grandes, en terreno natural, obteniendo MDE precisos, y aportando las ventajas mencionadas de facilidad de uso, flexibilidad y ahorro de costes. Sin embargo, su uso en aplicaciones que requieren MDE de elevadas precisiones (mm) como los estudios de erosión hídrica a escala de laboratorio no está aún comprobado. Gómez-Gutiérrez *et al.* (2014a) realizan un estudio de erosión, pero en una pequeña cuenca de unas 5 ha; Nouwakpo *et al.* (2014) realizan su estudio en una parcela experimental de 9.75 x 3.66 m con un simulador de lluvia, y utilizan una aplicación basada en SfM, pero emplean imágenes verticales tomadas desde una plataforma deslizante ubicada sobre la parcela. No se han encontrado referencias a trabajos que apliquen el método SfM con imágenes convergentes a la obtención de MDE de precisiones milimétricas de parcelas experimentales de laboratorio de pequeño tamaño.

El trabajo desarrollado en esta tesis plantea la utilización de programas fotogramétricos basados en SfM para la realización de MDE de precisión que puedan emplearse en la cuantificación de la erosión experimentada en una parcela pequeña (68 x 75 cm) en condiciones de lluvia artificial en un simulador, con imágenes convergentes adquiridas con cámaras comerciales. Se trata de valorar la precisión obtenida y la adecuación del procedimiento, adaptándolo a las particulares necesidades del estudio y valorando

su efectividad global. La aportación de esta tesis es la comparación de las estimaciones realizadas a partir de los MDE con los resultados reales de sedimento arrastrado en la escorrentía recogida durante el experimento, proporcionando una forma de contrastar la validez del método.

Capítulo 3

Metodología

*And I'm
Lost in confusions
'Cause my things are material
Andmoreagain, Arthur Lee*

En este capítulo se presenta la metodología aplicada, describiendo los experimentos realizados, los materiales empleados y los pasos seguidos.

Se presenta en primer lugar una visión general de las distintas etapas del trabajo y el instrumental y material utilizado. Se describen con detalle las etapas de preparación del experimento de simulación de lluvia y la planificación y adquisición de datos mediante escáner láser y cámara fotográfica.

Se describe el procedimiento de medición del sedimento arrastrado por el flujo de agua en la simulación de lluvia y el cálculo de la densidad aparente del suelo de la parcela. Se detalla a continuación el procedimiento seguido en el tratamiento de los datos para la obtención de los MDE, describiendo los programas empleados y las herramientas aplicadas.

Por último, se describe el procedimiento de diferencia de MDE (DoD) aplicado para determinar el volumen de cambio entre dos superficies sucesivas y su clasificación como zonas de erosión o deposición.

3.1 Materiales y métodos

En este apartado se describe la metodología aplicada, la secuencia de etapas seguida y los materiales empleados.

3.1.1 Esquema general del procedimiento

El trabajo propuesto se estructura en una serie de etapas sucesivas (Figura 3.1) que se describen a continuación de manera general.

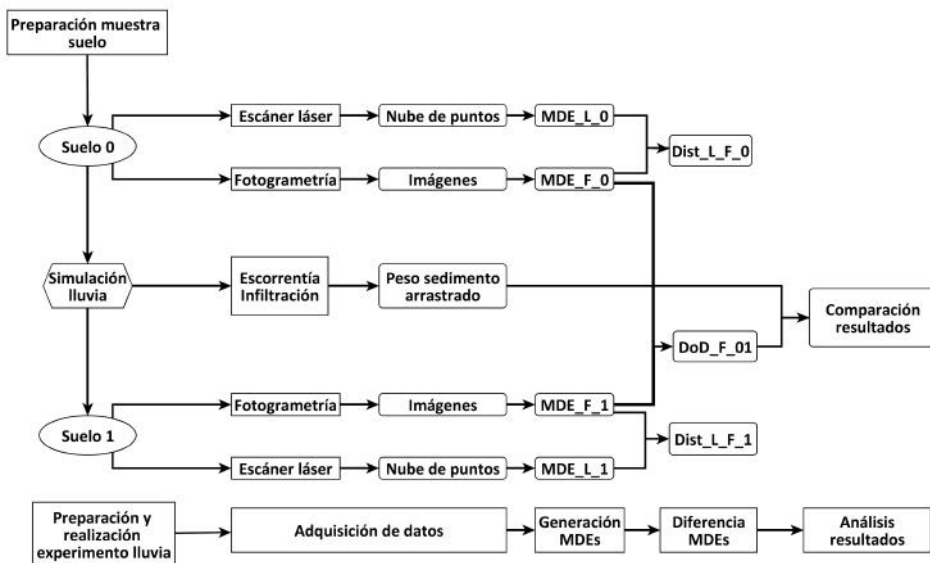


Figura 3.1: Esquema general de las etapas del trabajo

Etapas del trabajo:

1. Preparación del experimento de simulación de lluvia:
 - (a) Preparación de la bandeja con la muestra de suelo.
 - (b) Ubicación de la bandeja en el simulador de lluvia, con la pendiente adecuada.

- (c) Colocación de las señales correspondientes a los puntos de apoyo en los bordes de la bandeja y en la estructura del simulador.
 - (d) Medición de los puntos de apoyo señalizados mediante métodos topográficos.
2. Adquisición de datos:
- (a) Obtención de las imágenes de la superficie de la bandeja de suelo con la cámara fotográfica.
 - (b) Escaneo de la superficie de la bandeja de suelo con el escáner láser.
 - (c) Realización del episodio de simulación de lluvia de intensidad y duración establecidas.
 - (d) Recogida de la escorrentía e infiltración generadas durante la lluvia artificial.
 - (e) Adquisición de datos posterior:
 - i. Obtención de imágenes de la superficie de la bandeja de suelo tras la lluvia.
 - ii. Escaneo de la superficie de la bandeja de suelo con escáner láser.
 - (f) Repetición de los pasos c, d y e para cada episodio de lluvia.
3. Medida del sedimento arrastrado en la escorrentía e infiltración.
4. Procesamiento de las nubes de puntos láser.
5. Generación de los MDE correspondientes a cada episodio de lluvia a partir de las imágenes (MDE_F).
6. Comparación entre nubes de puntos láser y fotogramétricas.
7. Cálculo de las diferencias entre MDE sucesivos (DoD_F).
8. Análisis de los resultados y comparación con el sedimento recogido en la escorrentía.

3.1.2 Materiales

Los materiales y programas empleados se enumeran a continuación. Su descripción se realizará en posteriores apartados.

- Simulador de lluvia.
- Mesa y bandeja de simulación.
- Recipientes para recogida de agua y sedimentos.
- Anillo estándar de toma de muestras de suelo.
- Balanza de precisión.
- Calibrador (pie de rey) de precisión submilimétrica.
- Estufa de laboratorio.
- Papel de filtro estándar.
- Embudos.
- Probeta graduada y vasos de precipitado.
- Señales para marcar los puntos de apoyo.
- Estación total automática sin reflector Leica T2000.
- Cámara reflex Canon EOS 1100D, objetivo de zoom variable Canon EF-S 18-55 mm y trípode.
- Escáner láser Leica ScanStation2.

Software:

- Leica Cyclone.
- CloudCompare v 2.6.1.
- Agisoft Lens v 0.4.1.
- AgiSoft Photoscan Professional v 1.1.6.
- AutoDesk 123D Catch.
- ESRI ArcMap 10.1.

3.2 Diseño del experimento de simulación de lluvia

En el presente trabajo se ha diseñado un experimento para la medición de la escorrentía superficial en laboratorio en una parcela pequeña de suelo de pendiente uniforme del 10% sin cobertura vegetal, con simulación de lluvia en episodios de distinta duración.

Se empleará la instalación existente en el Laboratorio de Suelos de la UPV (Ibáñez Asensio *et al.*, 2012).

Se dispone de un simulador de lluvia fijo formado por una estructura metálica de dimensiones 3,10 x 1,60 x 2,00 m (altura x anchura x profundidad) que soporta el mecanismo generador de las gotas, de forma que esté situado horizontalmente a 2 m de altura sobre la bandeja de suelo (Figura 3.2).



Figura 3.2: Simulador de lluvia en las instalaciones del Laboratorio de Suelos (UPV)



Figura 3.3: Equipo regulador de presión

El mecanismo generador de la lluvia es una boquilla de pulverización instalada en una manguera de PVC, fijada a una barra metálica que se acopla a la parte superior de la estructura del simulador. Antes de la boquilla se sitúa un manómetro que indica la presión de trabajo. Para conseguir una presión constante durante toda la simulación se dispone de un equipo regulador de presión situado al pie del simulador (Figura 3.3). La presión de trabajo establecida para toda la simulación fue de 2,3 bar.

Se seleccionó una boquilla de pulverización en lugar de un gotero con el objetivo de reducir el efecto de la erosión por salpicadura mediante la disminución del tamaño de la gota (Hancock y Willgoose, 2001). Se considera que la cantidad de sedimento que puede saltar fuera de la bandeja y por tanto dejar de recogerse no es significativo para la intensidad de lluvia y tamaño de gota aplicados en la simulación.

Bajo este mecanismo se encuentra instalada una mesa de simulación de 1 m de altura, con una bandeja de simulación de 68 x 75 cm que contiene la muestra de suelo. La mesa dispone de un sistema de recolección del material erosionado por escorrentía superficial: el agua y los sedimentos son recogidos por un canalón situado en la parte delantera que los vierte a un recipiente mediante un tubo flexible de PVC. En la parte posterior de la mesa de simulación un mecanismo de elevación permite levantar la parte posterior de la bandeja, permaneciendo fija la parte delantera, hasta conseguir la pendiente deseada para el experimento (Figura 3.4). Además, la bandeja dispone de un tubo de desagüe en el fondo que permite recoger el agua infiltrada en el suelo en otro recipiente (Figura 3.5). Los recipientes de recogida de escorrentía e infiltración se sustituyen conforme se van llenando, se rotulan adecuadamente y se almacenan para su posterior tratamiento.

La correcta realización del experimento de simulación requiere que en la bandeja se utilice un material erosionable con poca cohesión entre partículas y baja capacidad de infiltración, para que pueda producirse escorrentía en un tiempo breve. Generalmente se usan suelos naturales (Rieke-Zapp y Nearing, 2005; Berger *et al.*, 2010; Heng *et al.*, 2010; Moritani *et al.*, 2011) , aunque también se han utilizado materiales como cenizas volantes (*fly ash*) procedentes de los residuos de carbón de las centrales eléctricas (Hancock y Willgoose, 2001).



Figura 3.4: Mesa de simulación



Figura 3.5: Bandeja de simulación

La muestra de suelo se preparó de la siguiente manera: se colocó en el fondo de la bandeja una capa de pequeñas piezas de poliestireno expandido de 3 x 2 cm, para permitir el drenaje del agua de infiltración. Sobre ellos se colocó una malla textil para impedir la pérdida de sedimentos. A continuación se dispuso una capa de 10 cm de suelo natural de textura arenosa, sin fragmentos gruesos. Se humedeció repetidas veces para que tuviera una densidad aparente similar a la del suelo natural y homogénea en toda la parcela.

Se tomaron muestras del suelo antes de la lluvia (Figura 3.6) y se pesaron (Figura 3.7) para calcular posteriormente su densidad aparente, como se explica en el apartado 3.4 .

Un aspecto particular de esta instalación que hubo que tener en cuenta fue que al estar ubicado el simulador en un invernadero (Figuras 3.2 y 3.3), tanto la estructura del simulador como la del propio invernadero provocaban sombras duras durante todo el día sobre la superficie de la bandeja, como se pudo comprobar durante las pruebas previas (Figura 3.8). Esta situación se debe evitar siempre al tomar las imágenes, y especialmente cuando se va a aplicar la correspondencia automática. Se recurrió a colgar sobre la estructura del simulador unas cortinas de plástico blanco que filtraran la luz solar directa, como se puede apreciar en las figuras 3.2 y 3.9, con excelentes resultados.

Una vez colocada la bandeja en la mesa de simulación, y situada ésta convenientemente debajo de la boquilla de pulverización, se



Figura 3.6: Muestra inalterada de suelo de la bandeja



Figura 3.7: Pesado de la muestra



Figura 3.8: Sombras sobre la superficie de la bandeja en las pruebas



Figura 3.9: Señales en simulador

dispusieron una serie de señales sobre el soporte de la mesa y del simulador (Figura 3.9). Se trata de de dos tipos: señales circulares compuestas por un círculo negro sobre fondo blanco, de diámetro de 18 mm y ancho 3 mm, y un círculo interior negro de 5 mm de diámetro, que se puedan identificar fácilmente en la nube de puntos, y señales adicionales sobre el borde de la bandeja, en forma de puntos o líneas blancas. Se empleó una estación total para realizar las mediciones necesarias para dar coordenadas a estas señales en un sistema de referencia rectangular local, con eje Z coincidente con la vertical del lugar. Este sistema de referencia se empleó para el posterior posicionamiento y comparación de los MDE. El procedimiento seguido

en la determinación de las coordenadas de los puntos se detalla en el Anexo B.

3.3 Adquisición de datos

Una vez preparado el experimento de simulación, se procedió a su realización.

Antes de empezar la primera simulación de lluvia se realizó un escaneo y se tomaron imágenes de la bandeja de suelo; estos datos y los modelos generados a partir de ellos se numeraron como 0 (inicial).

Se efectuaron cinco simulaciones de lluvia consecutivas de distintas duraciones: una simulación inicial de 15 minutos, seguida de una de 30 y luego de tres más de 60 minutos.

Durante cada episodio se recogió la escorrentía e infiltración totales generadas.

Después de cada episodio se realizó un escaneo de la superficie y se tomaron imágenes de la bandeja, numerándose de 1 a 5.

Se detallan a continuación los procedimientos seguidos.

3.3.1 Adquisición de imágenes

La estrategia de adquisición de las imágenes que se emplearán para la obtención del modelo 3D es fundamental para conseguir los resultados deseados. Un procedimiento ampliamente seguido en la adquisición de imágenes para la documentación fotogramétrica de objetos es el establecido por Waldhäusl y Ogleby (1994) en las conocidas como normas CIPA 3x3, diseñadas inicialmente para la obtención de pares estereoscópicos clásicos. En estos casos, el objetivo era encontrar el número mínimo de posiciones óptimas de toma de imágenes.

Actualmente las cámaras digitales y los algoritmos automáticos permiten la adquisición y procesamiento eficientes para grandes conjuntos de datos. La obtención de datos 3D a partir de imágenes se realiza mediante métodos de correspondencia densa de imágenes (*dense image matching*) basados en algoritmos multivista estéreo,

en los que la correspondencia se realiza entre pares de imágenes seleccionados a partir un gran número de imágenes convergentes. Por lo tanto, no es necesario encontrar el número mínimo de estaciones óptimas; por el contrario, se ha de minimizar el riesgo de lagunas en el conjunto de datos debido a una cantidad insuficiente de imágenes, planteando una adquisición de imágenes con alta redundancia.

Wenzel *et al.* (2013) realizan una adaptación de las normas CIPA para aplicaciones de correspondencia densa de imágenes, proponiendo un enfoque simplificado para la selección manual de las estaciones para la adquisición de imágenes redundantes eficiente y sin lagunas. La estrategia de adquisición de imágenes propuesta se denomina "Un panorama cada paso", y consta de tres pasos:

1. Seleccionar la escala imagen
2. Seleccionar la distancia entre imágenes (tamaño del paso)
3. Adquirir un panorama en cada posición

Se describen a continuación con más detalle estos tres pasos.

1. Seleccionar la escala de las imágenes en función de las necesidades de precisión del trabajo.
 - (a) Establecer la precisión necesaria en la modelización del objeto.

En fotogrametría de objeto cercano con imágenes convergentes la precisión estimada σ_c en la determinación de las coordenadas de un punto individual medido en k imágenes se puede estimar como (Fraser, 1996; James y Robson, 2012):

$$\sigma_c = \frac{q \cdot D}{f \cdot \sqrt{k}} \cdot \sigma_i \quad (3.1)$$

siendo q un factor relacionado con la geometría de la red fotogramétrica que puede variar entre 0.4 y 2, D la distancia media cámara-objeto, f la distancia focal de la cámara, y σ_i la precisión en la mediciones imagen (Barazzetti *et al.*, 2010).

- (b) Determinar la distancia máxima al objeto para obtener la precisión establecida.

Podemos obtener la distancia cámara-objeto despejando D en (3.1):

$$D = \frac{\sigma_c \cdot f \cdot \sqrt{k}}{q \cdot \sigma_i} \quad (3.2)$$

La expresión (3.2) proporciona una aproximación al valor máximo de distancia cámara-objeto para obtener la precisión σ_c fijada.

(c) Adaptar el valor de la focal si es necesario.

La planificación de la toma de imágenes se realiza para una cámara previamente seleccionada, con unos determinados valores de tamaño de píxel y longitud focal. Si con estos parámetros fijados inicialmente no se obtiene un valor de distancia cámara-objeto adecuado se puede considerar el empleo de una focal diferente.

2. Seleccionar el tamaño del paso o distancia entre imágenes consecutivas.

(a) Determinar el tamaño máximo de paso.

Anchura del 20% de la superficie en la imagen anterior

(b) Considerar la complejidad de la geometría del objeto.

Establecer líneas base pequeñas para superficies complejas.

El tamaño de paso entre cada imagen debe ser más bien pequeño, para reducir al mínimo el riesgo de zonas sin datos y garantizar al mismo tiempo una alta superposición en las imágenes. De manera orientativa se puede establecer una anchura del 20% de la superficie que aparece en la imagen anterior.

3. Adquirir un panorama en cada posición, si no es posible cubrir el objeto con una sola imagen desde dicha posición.

(a) Cada paso, un panorama

Cada panorama debe cubrir el objeto de interés.

Cada panorama puede contener varias imágenes (no se requiere solape dentro del panorama).

(b) Adaptar tamaño del paso.

Asegurar un 80% de solape con el panorama anterior.

Asegurar que las partes potencialmente ocluidas del objeto son visibles en al menos 3 imágenes (reducir el tamaño del paso si es necesario).

(c) Adquirir imágenes a diferentes alturas en cada estación.

Habilitar diferentes ángulos de visión sobre el objeto.

En cada paso se adquiere un panorama. Si el objeto no se puede cubrir con una única imagen, se toman múltiples imágenes desde el mismo punto. Entre estas imágenes solo se necesita un solape mínimo para evitar huecos. Un solape mayor no aporta beneficios, pues para la estimación de profundidades se necesitan imágenes tomadas desde distintos puntos, no desde el mismo. Si es posible, se tomarán imágenes a diferentes alturas en cada estación, con el fin de establecer una distribución homogénea y mejorar la exactitud e integridad del ajuste.

La precisión de la medición fotogramétrica depende principalmente de la escala de la imagen y del ángulo de intersección de las imágenes. Escalas de imágenes y ángulos de intersección pequeños producen imágenes con gran similitud en las que la correspondencia ofrece buenos resultados, pero poca precisión en el cálculo de profundidad debido a la debilidad de las condiciones geométricas. Por el contrario, ángulos de intersección y escalas de imagen grandes proporcionan mayor precisión en la profundidad, pero la similitud de imagen es inferior y la densidad de puntos de la correspondencia es menor (Wenzel *et al.*, 2013). La precisión mejora significativamente al aumentar el número de imágenes en que aparece un mismo punto, y el número de puntos medidos por imagen ((Remondino y El-Hakim, 2006).

Otro aspecto importante es la nitidez y calidad geométrica de las imágenes obtenidas. Waldhäusl y Ogleby (1994) y Wenzel *et al.* (2013) establecen también una serie de recomendaciones respecto a la elección de la cámara y el objetivo, y a los ajustes y parámetros generales aconsejables. Los conceptos manejados son conceptos básicos de fotografía, y existe una amplia bibliografía sobre esta disciplina; sin embargo la mayoría de libros sobre fotografía realizan

una breve descripción de los conceptos técnicos y se centran sobre todo en la parte artística. En el caso de las imágenes empleadas para fotogrametría, el aspecto artístico no es lo importante, sino la calidad geométrica, directamente relacionada con las tecnologías de captación de imagen y los conceptos básicos de Óptica geométrica. Cabe destacar a Gómez González (2012), que se centra en los fundamentos básicos de Óptica y su aplicación a las cámaras fotográficas digitales, proporcionando una detallada y actualizada revisión del funcionamiento y prestaciones de una cámara digital.

Las recomendaciones sobre la cámara y los ajustes empleados en la obtención de las imágenes (Waldhäusl y Ogleby, 1994; Wenzel *et al.*, 2013) se pueden resumir en:

1. Cámara y objetivos:
 - Preferibles sensores grandes
 - Objetivos gran angulares de longitud focal fija
 - Sin estabilización de imagen.
2. Ajustes de la cámara:
 - Tiempo de exposición corto ($<1 / 100s$) o trípode
 - Suficiente profundidad de campo:
 - Apertura pequeña
 - Utilizar la distancia hiperfocal como distancia de enfoque
 - ISO baja
 - Evitar sobreexposición
3. Apoyo geométrico:
 - Información de escala: al menos una distancia medida en tres imágenes.

Todas estas recomendaciones se han tenido en cuenta en mayor o menor medida para la planificación y adquisición de las imágenes de la bandeja de suelo durante el experimento.

Se ha empleado una cámara fotográfica reflex digital Canon EOS 1100D, con un objetivo de zoom variable Canon EF-S 18-55 mm. Se trata de una cámara réflex sencilla, de gama baja, cuyas principales características se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas de la cámara Canon EOS 1100D

Especificaciones técnicas Canon EOS 1100D	
Sensor	CMOS 12,2 Mp de 22,2 x 14,7 mm Filtro de paso bajo Relación de aspecto 3:2
Factor de recorte	1.6x
Procesador de imagen	DIGIC 4
Montura objetivo	EF/EF-S
Sensibilidad ISO	100 - 6400
Tipo obturador	Obturador plano focal controlado electrónicamente
Velocidad obturador	30-1/4000 s (en incrementos de 1/2 ó 1/3 de punto), Bulb
Sistema/puntos AF	AF en 9 puntos
Compensación de la exposición	+/-5 EV en incrementos de 1/3 o 1/2 paso

Para obtener imágenes de la bandeja de suelo completa se establece la focal de trabajo en 18 mm, correspondiente a un objetivo gran angular. Este valor se mantendrá fijo para todas las imágenes.

Para la planificación de la toma de imágenes se realizó una estimación inicial de la distancia cámara-objeto empleando las ecuaciones (3.1) y (3.2).

En el caso de un levantamiento con imágenes convergentes con una cobertura completa del objeto, en anillo, en el que cada punto objeto aparezca en al menos 4 imágenes se puede considerar $q=1$, y suponiendo que la precisión en la medición imagen es de 1/2 píxel, con un tamaño de píxel $p=10$ micras, para una precisión deseada $\sigma_c = 0.5$ mm la obtendríamos a partir de la ecuación 3.2 una distancia $D=3.6$ m.

La disposición del simulador de lluvia en el invernadero permite realizar la toma de las imágenes alrededor de la mesa de simulación, en forma de anillo, sin que haya zonas de oclusión, consiguiendo distancias cámara-objeto medias de 1.5 m para todos los puntos del objeto (Figura 3.10), inferiores al valor de distancia obtenido de 3.6 m, con lo cual la precisión en las coordenadas objeto obtenidas será de 0.5 mm o mejor.

Por otro lado, se calculó la distancia hiperfocal (Ecuación 3.3) correspondiente a los distintos valores de apertura para la cámara y

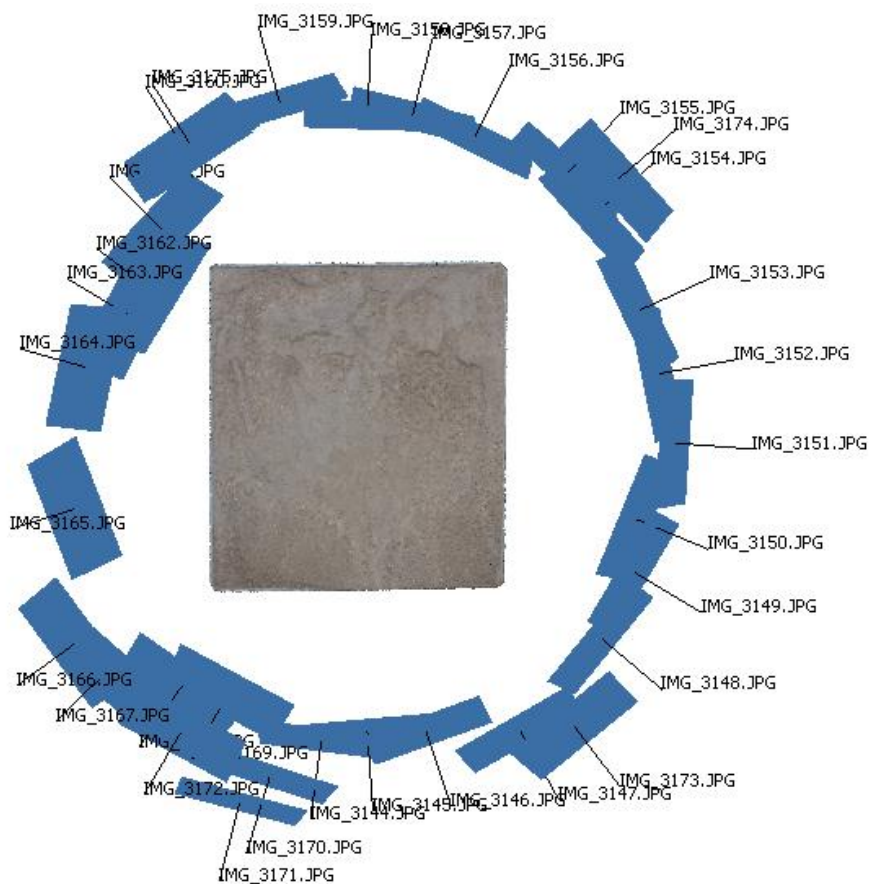


Figura 3.10: Distribución de las imágenes alrededor de la mesa de simulación

focal consideradas, estableciendo un valor para el diámetro del círculo de confusión (Ecuación 3.4) de 0.018 mm.

$$H = \frac{f^2}{\text{apertura} \cdot dcc} \quad (3.3)$$

$$dcc = \frac{dcc_{35mm}}{\text{factor recorte}} \quad (3.4)$$

Tabla 3.2: Distancias hiperfocales y profundidad de campo de la cámara Canon EOS 1100D para una focal $f=18$ mm

Apertura	Distancia Hiperfocal	Profundidad campo
f/3.5	5.14	2.57 $-\infty$
f/4	4.50	2.25 $-\infty$
f/4.5	4.00	2.00 $-\infty$
f/5	3.60	1.80 $-\infty$
f/5.6	3.21	1.61 $-\infty$
f/6.3	2.86	1.43 $-\infty$
f/7.1	2.54	1.27 $-\infty$
f/8	2.25	1.13 $-\infty$
f/9	2.00	1.00 $-\infty$
f/10	1.80	0.90 $-\infty$
f/11	1.64	0.82 $-\infty$
f/13	1.38	0.69 $-\infty$
f/14	1.29	0.64 $-\infty$
f/16	1.13	0.56 $-\infty$
f/18	1.00	0.50 $-\infty$
f/20	0.90	0.45 $-\infty$
f/22	0.82	0.41 $-\infty$
f/25	0.72	0.36 $-\infty$

Focal: 18 mm dcc=0.018 mm

Los resultados se muestran en la tabla 3.2. Se seleccionó una apertura $f/22$, correspondiente a una distancia hiperfocal de 0.82 m, que proporciona una profundidad de campo de 0.41 m a infinito. Se asegura así que tomando como distancia de enfoque la distancia hiperfocal la profundidad de campo será suficiente y las imágenes de la bandeja estarán correctamente enfocadas y serán nítidas.

Una apertura tan pequeña requiere tiempos de exposición elevados. Se seleccionó en la cámara el modo Prioridad a la apertura, de forma que se calculara automáticamente el tiempo de exposición en función de la luz de la escena; se empleó un trípode para poder obtener imágenes con tiempo de exposición largos sin movimientos ni trepidaciones, desactivando el estabilizador de imagen y el autoenfoco. En este caso, al estar el simulador de lluvia ubicado en un invernadero con paredes de cristal y materiales translúcidos, la escena era lo bastante luminosa como para obtener imágenes correctamente expuestas con tiempos de obturación de entre 0.1 y 1 segundos. La sensibilidad se mantuvo en ISO 100.

Finalmente, las imágenes se tomaron a una distancia media de 0.5 m de la mesa de simulación, con un paso o separación medio de 0.3 m,

y tomando además algunas imágenes a distinta altura para reforzar la geometría del ajuste (Figura 3.10). En la tabla 3.3 se muestran los parámetros empleados en la adquisición de las imágenes.

La escala media aproximada resultante de las imágenes es 1/70. La distancia de enfoque fue de aproximadamente 1 m (distancia media desde la cámara a la zona central de la bandeja), ligeramente superior a la distancia hiperfocal, con una profundidad de campo de 0.45 m a infinito; para el cálculo de la profundidad de campo *in situ* se empleó una aplicación para Android, HyperFocal (Figura 3.11).

Tabla 3.3: Parámetros de adquisición de las imágenes

Parámetros imágenes	
Cámara	Canon EOS 1100D
Focal	18 mm
Formato archivo	JPG
Resolución	2256x1504 pixels
Tamaño pixel	10 μ m
Apertura	f/22
Tiempo exposición	0.1-1 s
Sensibilidad ISO	100

Se estableció una resolución de las imágenes de 2256x1504 píxels, inferior a la resolución máxima de la cámara; se adoptó este valor porque las imágenes del experimento se emplearán para obtener modelos 3D con distintos softwares como 123DCatch, que recomiendan el empleo de imágenes de resolución media (AutoDesk, 2015), y Agisoft PhotoScan, cuyo consumo de memoria y recursos de computación para la obtención de modelos de alta calidad hace muy complicado el trabajo si las imágenes son de resolución alta. Los resultados de la previsión de error según la ecuación 3.1 confirman que la resolución de las imágenes es suficiente para el trabajo.

3.3.2 Adquisición de nubes de puntos con escáner láser

Para comparar los datos obtenidos mediante técnicas fotogramétricas se realizó un escaneado de la superficie de la bandeja de suelo.

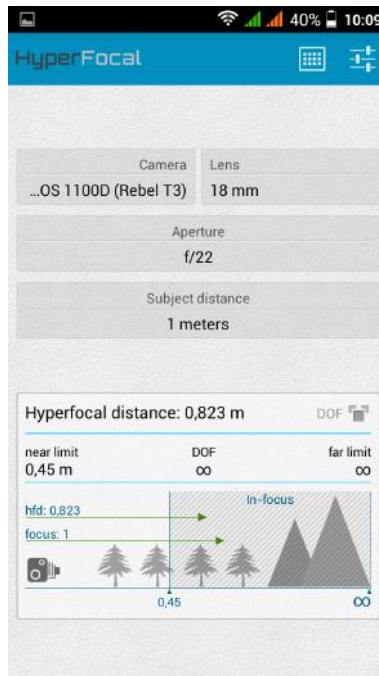


Figura 3.11: HyperFocal: aplicación Android para el cálculo de la profundidad de campo

En la planificación del escaneado láser se siguieron las directrices establecidas por Lerma *et al.* (2008):

1. Análisis del área de escaneado: tipo de superficie, visibilidad, restricciones de acceso.
2. Determinación de la posición óptima del escáner láser.
 - Comprobar que las posiciones cubren la mayor área posible sin obstáculos en la línea de vista y que se producen las menos sombras posibles.
 - Comprobar que se cumplen los alcances mínimo y máximo para alcanzar la precisión requerida. Cuanto mayor sea la distancia al objeto, menor será la precisión y la resolución.
 - Minimizar la aparición de pequeños ángulos de intersección. Con ángulos muy agudos el haz láser no se refleja tan bien, por lo que la precisión del escáner es menor.

3. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia.

Los puntos de referencia se usan principalmente para registrar los escaneos realizados desde diferentes posiciones. En general debe haber al menos 4 puntos de referencia/dianas bien distribuidas en cada escaneado.

4. Definición del área a escanear.

Dependiendo del modelo de escáner se puede realizar directamente desde el propio escáner o desde el ordenador que lo controla. Se suele capturar primero una imagen de la escena y luego seleccionar sobre ella el área específica a escanear.

5. Determinación de la resolución.

La resolución es la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, y determina la densidad de puntos de la nube. La mayoría de los escáneres trabajan con un ángulo constante entre dos puntos consecutivos (basado en coordenadas polares), de forma que se establece la resolución del escáner para una determinada distancia. Los puntos escaneados a una distancia mayor tendrán una resolución menor, mientras que los puntos más cercanos tendrán una resolución más alta. Para establecer la resolución adecuada se suele tomar un punto de muestra en la zona más alejada del escáner.

En este trabajo se empleó el escáner láser Leica ScanStation2. Heng *et al.* (2010) utilizan este mismo modelo de escáner en un estudio sobre erosión en un simulador de lluvia con una bandeja de suelo de dimensiones algo mayores (3.9 x 1.4 m). Se trata de un escáner basado en tiempo de vuelo, con velocidad de escaneo hasta 50000 puntos/seg, precisión de medición simple de 4 mm en distancia y 6 mm en posición, campo de visión completo de 360° en horizontal y 270° en vertical, cámara digital integrada, compensación de doble eje y alcance hasta 300 m. En la Tabla 3.4 se detallan las especificaciones técnicas del escáner.

Se decidió realizar un único escaneo para cada episodio, dado que la zona a escanear era de dimensiones muy reducidas y que no había zonas ocultas que necesitaran ser escaneadas desde otra posición. Se ubicó el escáner frente a la bandeja, a una distancia de 1.5 m; se

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas Leica ScanStation2 (Leica Geosystems, 2007)

Especificaciones de rendimiento de Leica ScanStation 2							
Tipo de instrumento	Escáner láser pulsado de alta velocidad, con compensación de doble eje, con precisión, alcance y campo de visión a nivel topográfico						
Interfaz de usuario	Portátil o Tablet PC						
Cámara	Cámara digital de alta resolución integrada						
Precisión de medición simple	<table border="0"> <tr> <td>Posición*</td> <td>6 mm</td> </tr> <tr> <td>Distancia*</td> <td>4 mm</td> </tr> <tr> <td>Ángulo (horizontal/vertical)</td> <td>60 μrad/60 μrad (3,8 mgon/3,8 mgon) **</td> </tr> </table>	Posición*	6 mm	Distancia*	4 mm	Ángulo (horizontal/vertical)	60 μ rad/60 μ rad (3,8 mgon/3,8 mgon) **
Posición*	6 mm						
Distancia*	4 mm						
Ángulo (horizontal/vertical)	60 μ rad/60 μ rad (3,8 mgon/3,8 mgon) **						
Tamaño de punto láser	Desde 0 – 50 m : 4 mm (basado en FWHH); 6 mm (basado en Gaussian)						
Superficie modelada precisión/ruido	2 mm **						
Adquisición de señal de puntería	2 mm desviación estándar						
Compensador de eje doble	Resolución 1", alcance dinámico +/- 5'						
Monitorización de integridad de datos	Autocomprobación periódica durante el funcionamiento y la activación						
Sistema de escaneo láser	<table border="0"> <tr> <td>Alcance</td> <td>300 m @ 90%; 134 m @18 % albedo</td> </tr> <tr> <td>Velocidad de escaneo</td> <td>instantánea máxima: hasta 50.000 puntos/seg Promedio: depende de la densidad de escaneo específica y el campo de visión</td> </tr> <tr> <td>Densidad de escaneo</td> <td>< 1 mm máx, en todo el rango; espaciado de puntos horizontal y vertical totalmente seleccionable; capacidad de intervalo de punto único</td> </tr> </table>	Alcance	300 m @ 90%; 134 m @18 % albedo	Velocidad de escaneo	instantánea máxima: hasta 50.000 puntos/seg Promedio: depende de la densidad de escaneo específica y el campo de visión	Densidad de escaneo	< 1 mm máx, en todo el rango; espaciado de puntos horizontal y vertical totalmente seleccionable; capacidad de intervalo de punto único
Alcance	300 m @ 90%; 134 m @18 % albedo						
Velocidad de escaneo	instantánea máxima: hasta 50.000 puntos/seg Promedio: depende de la densidad de escaneo específica y el campo de visión						
Densidad de escaneo	< 1 mm máx, en todo el rango; espaciado de puntos horizontal y vertical totalmente seleccionable; capacidad de intervalo de punto único						
Clase de láser	3R (IEC-60825-1), verde visible						
Iluminación	Funcionamiento completo desde condiciones de luz solar brillante a oscuridad completa						
Fuente de alimentación	36 V; CA o CC; conectable en caliente						

Especificaciones sujetas a cambio sin previo aviso

Véase Leica ScanStation 2 Especificaciones de producto para datos técnicos completos

* A 50 m de alcance, un sigma

** Un sigma

estacionó a la altura máxima del trípode, 2 m, para que los ángulos de incidencia no fueran demasiado pequeños.

La posición del escáner no se cambió; todos los escaneados se realizaron desde la misma posición. Así, no fue necesario ubicar dianas de referencia, puesto que no había que registrar nubes de puntos desde distintas posiciones. La georreferenciación de los escaneos se realizó empleando las señales previamente ubicadas sobre el simulador.

Se realizó una captura de imagen del escáner de la zona del simulador y se seleccionó una zona inicial mayor que el área de interés (superficie

de la bandeja de simulación) para realizar un primer escaneado (Figura 3.12).

A partir de este primer escaneo se comprobó que la posición seleccionada era adecuada: la zona de la bandeja no presentaba zonas de sombra, y se distinguían correctamente las señales para la georreferenciación.

Se redefinió la zona a escanear para limitarla a la bandeja de suelo, con el fin de minimizar tanto el tiempo de la toma de datos como el posterior trabajo de tratamiento de las nubes de puntos.

Se estableció la resolución del escaneado en 1 mm a una distancia de 2 m.

Se realizaron seis escaneados: un escaneado inicial antes de empezar la simulación de lluvia (Figura 3.13a), y un escaneado después de cada uno de los episodios de lluvia (Figura 3.13b), dejando transcurrir el tiempo necesario para que no hubiera agua en la superficie que pudiera ocasionar reflejos.

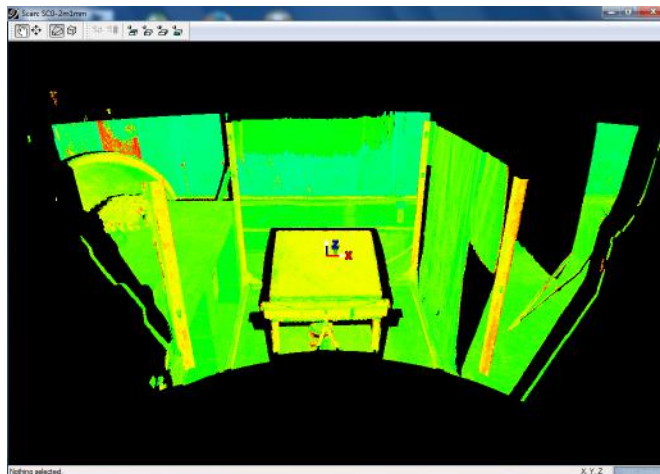


Figura 3.12: Leica Cyclone: Escaneo inicial

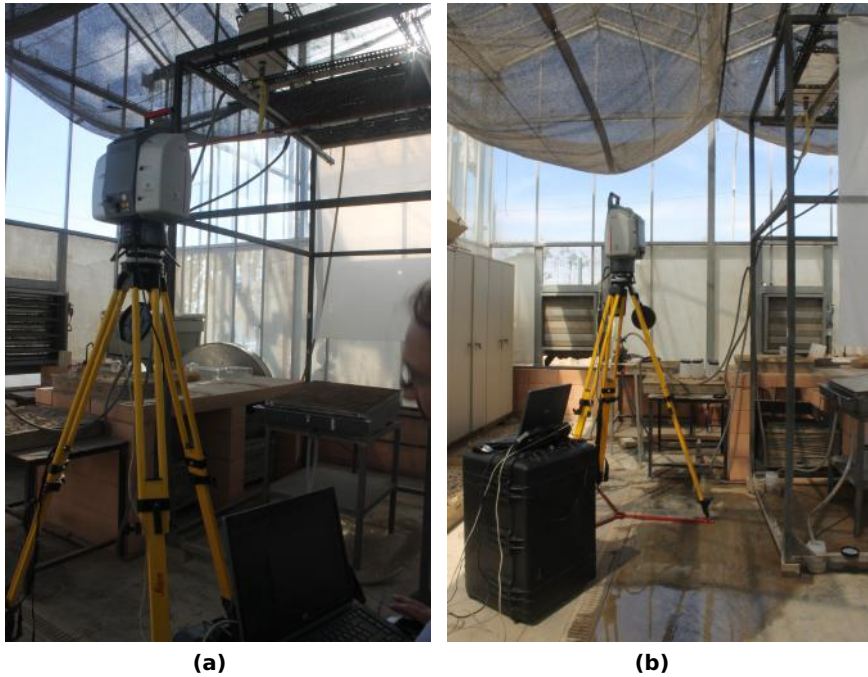


Figura 3.13: Distintos momentos de la adquisición de datos del escáner: **(a)** Inicio; **(b)** Tras el último episodio de lluvia

3.3.3 Recogida de escorrentía e infiltración

A lo largo de cada uno de los episodios de lluvia se recogió de forma sistemática la escorrentía e infiltración producidas en la bandeja de simulación.

Se preparó un número suficiente de recipientes adecuados, de plástico, con tapa hermética y capacidades de 2.25 l y 1.25 l. Se colocó el recipiente de recogida convenientemente para verter mediante el tubo de PVC el agua de escorrentía recogida en el canalón. El tiempo promedio de llenado de los recipientes fue de 4 minutos (más largo al inicio de la lluvia y más corto conforme el suelo se saturaba).

Se anotó la hora del inicio de la lluvia y la hora del inicio de la escorrentía. Los recipientes de recogida se rotularon secuencialmente, anotando también la hora de su recogida. Una vez finalizado cada uno de los episodios de lluvia, se dejó transcurrir un tiempo hasta

comprobar que finalizaba la escorrentía. Con el fin de arrastrar los sedimentos que pudieran haber quedado detenidos en el canalón de recogida y el tubo de PVC del canalón al recipiente, se vertió una cantidad adicional de agua, previamente medida, que se anotó también con el fin de realizar posteriormente las correcciones oportunas. Se recogieron un total de 45 botes de escorrentía.

La mesa de simulación dispone también de un sistema de recogida de infiltración, mediante un tubo de desagüe a otro recipiente. Se anotó la hora de inicio de la infiltración y se rotularon los recipientes empleados, teniendo la precaución de utilizar un código (y un color) distinto al de los recipientes de escorrentía. La cantidad de agua de infiltración recogida fue bastante menor, con un total de 10 botes.

3.4 Medición de suelo perdido

Se describen los procedimientos y cálculos para la determinación del volumen de escorrentía e infiltración, el sedimento arrastrado y la tasa de erosión, y la densidad aparente del suelo.

3.4.1 Cálculo de sedimento arrastrado

El flujo de agua de escorrentía e infiltración recogida durante la simulación de lluvia permite determinar la cantidad de sedimentos arrastrados fuera de la bandeja.

El procedimiento llevado a cabo en laboratorio para obtener los sedimentos fue el habitual en este tipo de experimentos.

Se filtró el agua recogida en cada recipiente con papel de filtro para retener todas las partículas de sedimento. El filtro se secó previamente en estufa a 105° C para eliminar la humedad y se pesó una vez frío en una balanza de precisión. Se numeró cada filtro de la misma manera que el recipiente correspondiente, y se preparó el material necesario: para cada bote de agua de escorrentía se dispuso un recipiente de recogida del agua filtrada y un embudo conteniendo el filtro numerado (Figura 3.14a). Se filtró el agua contenida en cada recipiente de escorrentía, quedando retenidos en

el filtro los sedimentos (Figura 3.14b). El volumen de agua filtrado de cada recipiente se midió empleando una probeta graduada de 250 ml, anotándose todos los datos obtenidos y el volumen total correspondiente a cada recipiente, descontando el volumen de agua empleada para arrastrar los sedimentos en el sistema de recogida de la mesa de simulación y en el vaciado de los recipientes (Tabla A.1).



Figura 3.14: Filtrado del agua de escorrentía: **(a)** Preparación de los filtros; **(b)** Filtrado del agua de los recipientes

Una vez filtrada toda el agua, se secaron los filtros con los sedimentos atrapados en una estufa a 105°C durante 24 horas para eliminar la humedad. A continuación se pesaron de nuevo los filtros en la balanza de precisión. El peso del sedimento viene dado por la diferencia entre el peso inicial y final del filtro (Tabla A.1).

Se tiene así el peso de los sedimentos arrastrados fuera de la bandeja por la escorrentía en cada uno de los episodios de lluvia sucesivos.

Se realizó el mismo procedimiento para obtener el peso de los sedimentos arrastrados por el agua de infiltración (Tabla A.2).

3.4.2 Densidad aparente del suelo

Si se conoce la densidad aparente del suelo se puede calcular el volumen correspondiente al peso de sedimento arrastrado en la escorrentía. Inversamente, a partir de la densidad aparente se puede obtener el peso de sedimentos correspondiente a una determinada variación de volumen obtenida a partir de las diferencias entre los MDE.

Así pues, en primer lugar se determinará la densidad aparente del suelo empleado en la bandeja de simulación.

La densidad aparente ρ_b o *bulk density* se define como la relación entre el peso seco o masa M de una muestra de suelo dada y su volumen V (Chan, 2006). Se expresa habitualmente en g/cm^3 .

$$\rho_b = \frac{M}{V} \quad (3.5)$$

El volumen de la muestra incluye el volumen de las partículas de suelo y el volumen de poros o espacio entre las partículas de suelo. La densidad aparente depende de la textura y estructura del suelo y de su composición; es un indicador de algunas características importantes del suelo, como porosidad y estructura del suelo, aireación o capacidad de infiltración. En general, suelos sueltos, porosos o ricos en materia orgánica tiene una densidad aparente baja; suelos arenosos presentan densidades más altas que suelos limosos y arcillosos (United States Department of Agriculture, 2015). Los suelos arenosos suelen tener valores de densidad aparente de 1.4-1.9 g/cm^3 , mayores que los de las arcillas (0.9-1.4 g/cm^3) (Chan, 2006).

La determinación de la densidad aparente del suelo contenido en la bandeja de simulación se realizó de manera directa mediante el método del cilindro. Se tomó una muestra de suelo empleando un cilindro metálico de dimensiones conocidas; se insertó el cilindro en el suelo por presión, procurando no afectar a la estructura del suelo, hasta enrasarlo por la parte superior. Se extrajo con cuidado y se eliminó el sobrante por el otro extremo, dejando el cilindro lleno de suelo y enrasado por ambos extremos (Figura 3.6). Se tomaron dos muestras en dos puntos distintos de la bandeja de suelo.

Una vez en el laboratorio, se pesaron las muestras iniciales. A continuación se secaron en estufa a 105° C durante 24 h y se pesaron de nuevo, obteniendo la masa de suelo seco. Se midieron con un pie de rey el diámetro y altura de los dos cilindros empleados y se calculó su volumen.

Con los datos de la masa de suelo seco y volumen de las muestras se determinó el valor de la densidad aparente aplicando la ecuación 3.5, obteniéndose un valor medio de 1.43 g/cm^3 (Tabla A.3).

3.5 Calibración de la cámara

La calibración previa de la cámara no es imprescindible en la metodología SfM, pues una de las características de este método es que se determinan los parámetros de la cámara a la vez que las orientaciones de las imágenes. Sin embargo, esto conduce a que al procesar varios conjuntos de imágenes, como en este caso, se obtengan distintos modelos de cámara, incluso aunque la cámara empleada sea la misma con los mismos ajustes.

Se decidió realizar una calibración de la cámara como parte del trabajo, para tener el modelo de cámara y poder realizar distintas pruebas posteriormente durante la orientación y ajuste de los bloques de imágenes: considerando la cámara calibrada fija, o recalculando unos nuevos parámetros optimizados de la cámara.

Se realizará una calibración de la cámara previa a la toma de imágenes para el trabajo, mediante el programa *Agisoft Lens*. Este software automático de calibración emplea el modelo de cámara pinhole, y las distorsiones se modelan según el conocido modelo de distorsión de Brown (Brown, 1971). Se toman imágenes de un patrón tipo tablero de ajedrez (que puede estar impreso o mostrarse en una pantalla LCD) con la misma focal y ajustes que las imágenes del trabajo. Son necesarias un mínimo de tres imágenes, tomadas desde ángulos ligeramente distintos, de forma que el área de las imágenes esté totalmente cubierta por el patrón de calibración. Las fotos han de ser nítidas, con bordes entre casillas bien definidos. Las esquinas de las casillas del patrón se detectan automáticamente mediante un algoritmo de detección de esquinas (basado en el determinante del Hessiano). Se pueden determinar los siguientes parámetros de la cámara:

- f_x, f_y - longitud focal
- c_x, c_y - coordenadas punto principal
- K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 - coeficientes de distorsión radial y tangencial

El procedimiento seguido en la calibración de la cámara y los resultados obtenidos se muestran en el Anexo C. Para la calibración de la cámara empleada, la Canon EOS 1100D, se visualizó en una pantalla LCD el patrón de calibración. Se redujo el tamaño de las casillas del patrón, para obtener más esquinas que detectar y por tanto un mayor número

de puntos distribuidos por toda la imagen y determinar con mayor precisión los parámetros de distorsión de la cámara. Se establecieron los mismos ajustes que en la adquisición de las imágenes del trabajo (tabla 3.3): focal 18 mm, apertura f/22, ISO 100. Se tomaron cinco imágenes del patrón (figura C.1), que se procesaron con Agisoft Lens. Los resultados se presentan en un informe (Figura C.3) que muestra los parámetros de calibración estimados y sus errores (Figura C.4), además de un gráfico de las distorsiones radial y tangencial (Figuras C.5 y C.6). Estos resultados se guardaron como fichero de calibración de cámara de PhotoScan, en formato .xml (figura C.7).

3.6 Generación de Modelos Digitales de Elevaciones

Se describe en este apartado la obtención de los MDE a partir de los datos láser y de las imágenes obtenidas.

Para obtener los datos altimétricos a partir de las imágenes se seleccionaron dos de las aplicaciones basadas en SfM existentes en la actualidad: AutoDesk 123DCatch, una aplicación web gratuita, totalmente automatizada y de uso extremadamente sencillo, y Agisoft PhotoScan, una aplicación comercial con más control del proceso por parte del usuario.

3.6.1 Obtención de nubes de puntos con Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan es un programa de modelado 3D a partir de imágenes, que emplea las técnicas SfM y MVS. Trabaja con imágenes arbitrarias, convergentes, tomadas desde cualquier posición. Las etapas de orientación o alineación de las imágenes y de la reconstrucción del modelo 3D están completamente automatizadas. Permite generar nubes densas de puntos y modelos 3D con textura fotorrealística.

En general, el objetivo final del procesamiento de las imágenes con PhotoScan es construir un modelo 3D con textura. Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas (Agisoft, 2014):

- Alineación de la cámara. Se buscan puntos comunes en las imágenes y se determinan las correspondencias entre ellos; a partir de éstas se calcula la posición de la cámara para cada imagen y se optimizan los parámetros de calibración de la cámara. El resultado es el conjunto de posiciones de la cámara y una nube poco densa de puntos 3D del objeto.
- Obtención de la nube densa de puntos. A partir de las imágenes orientadas se calcula la profundidad para cada imagen y se combina esta información en una sola nube de puntos muy densa.
- Construcción de una malla poligonal 3D que representa la superficie del objeto basándose en la nube de puntos densa.
- Texturizado de la malla a partir de las imágenes y creación de las ortofotos.

En este caso, el principal objetivo es la obtención de nubes densas de puntos, con las que posteriormente se obtendrán MDE ráster. La generación de mallas poligonales con textura fotográfica no es necesaria.

Se describe a continuación el procedimiento empleado en los seis conjuntos de imágenes, correspondientes a los modelos 0 al 5.

En primer lugar se seleccionaron las imágenes que se iban a emplear y se cargaron en el programa. PhotoScan estima la calidad de imagen para cada una de las imágenes cargadas, basándose en el grado de nitidez de la parte mejor enfocada de la imagen, y calcula un valor entre 0 y 1 para cada una. Es recomendable que todas las imágenes empleadas tengan un valor superior a 0.5; valores inferiores corresponden a imágenes poco nítidas, que pueden disminuir la precisión de los resultados. Las imágenes empleadas presentaron valores de nitidez entre 0.70 y 0.98.

El siguiente paso es establecer el modelo de cámara. PhotoScan es capaz de ajustar los parámetros de calibración de la cámara de forma automática durante el cálculo de las orientaciones de las imágenes, partiendo de los valores iniciales extraídos de los datos EXIF de las imágenes; los valores ajustados también se pueden especificar a partir

de un fichero de cámara previamente obtenido en la calibración de la cámara. En este caso se disponía del fichero de la calibración realizada con Agisoft Lens (Figura C.7) , de modo que se establecieron estos parámetros como valores iniciales o precalibrados. En este punto se tiene la posibilidad de fijar estos parámetros, o permitir que se reajusten durante el proceso de orientación. Se realizó el proceso de las dos formas, con el fin de comparar luego los resultados obtenidos; se obtuvieron pues dos conjuntos de nubes de puntos para cada modelo de 0 a 5: uno considerando la cámara fija, y otro permitiendo el ajuste de los parámetros de calibración de la cámara.

A continuación se estableció el sistema de coordenadas del proyecto. PhotoScan alinea las imágenes sin necesidad de puntos de referencia, calculando las orientaciones en un sistema arbitrario; posteriormente la nube de puntos puede ser escalada y posicionada como convenga. Sin embargo también permite establecer un sistema de coordenadas basado en puntos de apoyo de coordenadas conocidas, de forma que las orientaciones y cálculos posteriores se obtienen ya en el sistema de referencia local deseado. Se optó por esta segunda opción para la obtención de las nubes de puntos de cada modelo en el mismo sistema de referencia que permitiera realizar las posteriores comparaciones.

Se midieron los puntos que se iban a emplear como referencia en todas las imágenes en las que aparecían, numerándolos convenientemente (Figura 3.15a). Se emplearon las señales colocadas en el simulador y las marcas de los bordes de la bandeja como puntos de referencia de coordenadas conocidas (Figura 3.15b). Las coordenadas en el sistema local de las señales de referencia se cargaron a partir de un fichero de texto (Tabla B.1).

Una vez medidos todos los puntos, se realizó la orientación de las imágenes. PhotoScan realiza esta operación de forma automática, detectando puntos en las imágenes, emparejando los puntos comunes y resolviendo un ajuste de haces de rayos con autocalibración para obtener las posiciones de las imágenes, las coordenadas de los puntos y los parámetros de la cámara (en su caso). La calidad del ajuste se puede estimar a partir del EMC obtenido en los puntos de apoyo. PhotoScan permite generar un informe con los datos y resultados del proyecto: número de fotos y estaciones, datos y parámetros de la cámara, errores de los puntos de apoyo tras el ajuste, densidad de la nube de puntos y rango de elevaciones del MDE, entre otros. Se

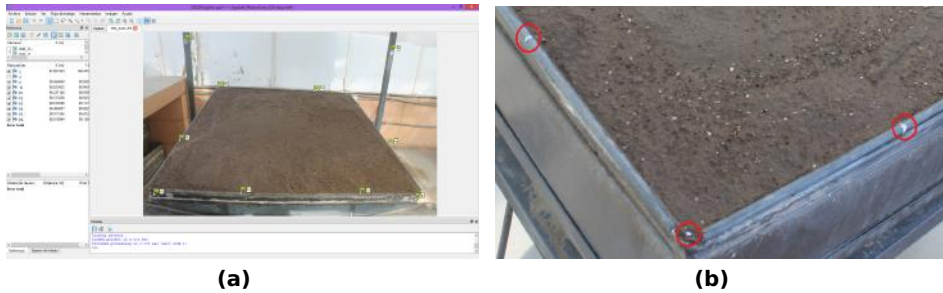


Figura 3.15: Photoscan: medición de puntos de referencia: **(a)** Ubicación de los puntos; **(b)** Detalle

generaron los informes correspondientes a cada MDE obtenido (Anexo D), donde figura como 'Error' el EMC obtenido; se consideró el valor de error total que en ellos aparece como el EMC del ajuste.

En este paso se obtiene una nube de puntos poco densa (Figura 3.16), con un número de puntos adecuado para realizar la orientación de las imágenes, pero insuficiente para la obtención de un MDE de precisión de la zona de interés. Se pasa a la etapa siguiente de generación de nubes densas de puntos.

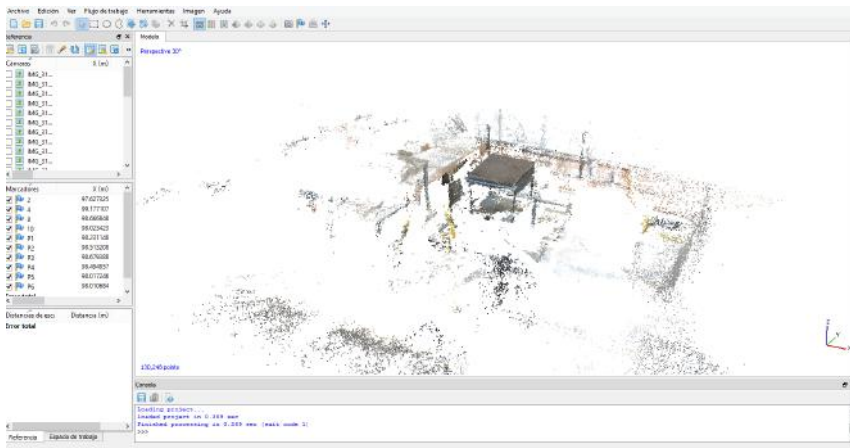


Figura 3.16: PhotoScan: nube de puntos poco densa inicial obtenida en la orientación de las imágenes

Se emplearon máscaras para especificar las áreas de las imágenes en las que se quiere generar la nube densa de puntos, evitando las

zonas que no corresponden a la bandeja de suelo (pero que en la etapa de búsqueda de puntos para la orientación sí son necesarias, pues proporcionan muchos más puntos redundantes). Se dibujaron sobre las imágenes polígonos delimitando la zona de interés (Figura 3.17a), y se guardaron las imágenes combinadas con las máscaras para poder volver a emplearlas en posteriores operaciones (Figura 3.17b).



Figura 3.17: Creación de máscaras: **(a)** PhotoScan: Definición de máscara sobre una imagen; **(b)** Imagen combinada con la máscara en el canal alfa

Se generó la nube densa de puntos, seleccionando las opciones de calidad alta y filtrado suave. El resultado es una nube de puntos con información de textura fotográfica mucho más densa que la inicial, y únicamente de la zona previamente delimitada con las máscaras (Figura 3.18).

La nube de puntos densa obtenida se exportó a formato XYZ: fichero ASCII de seis columnas, [X Y Z R G B], compatible con el resto de programas que se utilizarán. A partir de estos puntos se generó posteriormente un MDE ráster empleando el programa ArcMap, como se explica en el apartado 3.6.4.

Por último se generó a partir de esta nube de puntos la malla 3D con textura fotográfica (Figura 3.19), que se exportó posteriormente al formato de intercambio OBJ.

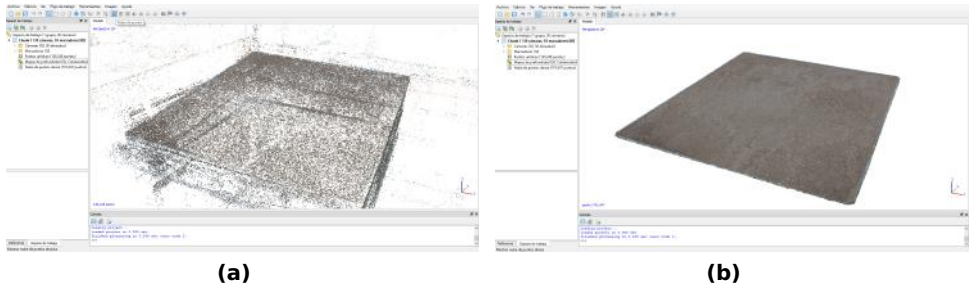


Figura 3.18: PhotoScan: resultado de la nube de puntos densa aplicando máscaras de imagen: **(a)** Nube poco densa inicial; **(b)** Nube densa obtenida

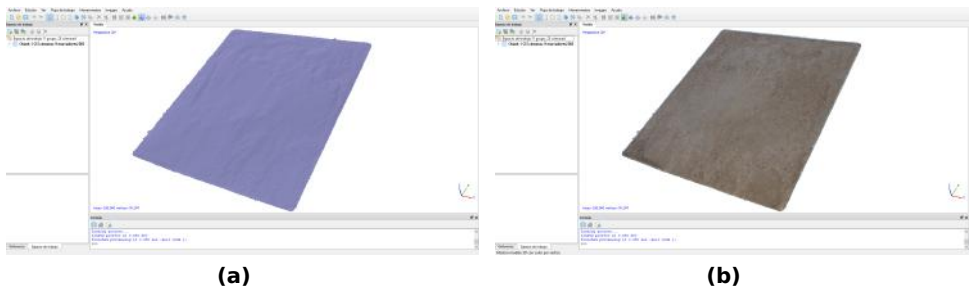


Figura 3.19: PhotoScan: Malla generada a partir de la nube densa de puntos: **(a)** Malla con sombreado; **(b)** Malla con textura fotográfica

3.6.2 Obtención de nubes de puntos con 123D Catch

AutoDesk 123DCatch es una aplicación web gratuita que construye un modelo 3D a partir de las imágenes proporcionadas por el usuario. Las imágenes se suben a la aplicación, se procesan de forma automática y se obtiene la malla 3D con textura fotorrealística; posteriormente se pueden realizar algunas operaciones sobre el modelo obtenido, como escalarlo o eliminar zonas. Este programa permite mucha menos interacción con el usuario, que dispone de poco control sobre el proceso.

Se realizaron los modelos 3D empleando las mismas imágenes que en PhotoScan (Figura 3.20).

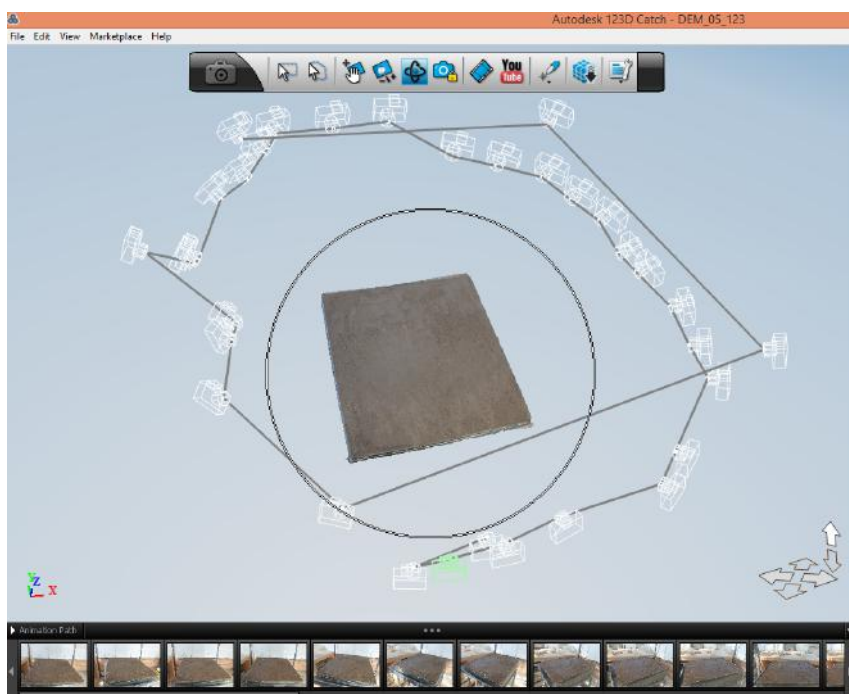


Figura 3.20: 123D Catch: modelo 3D obtenido

El programa produce una malla con textura fotográfica, bastante suavizada, de escala y posición arbitrarias, que hay que transformar posteriormente. En este caso no basta con escalar los modelos; es necesario referenciarlos al sistema local, puesto que se han de obtener las diferencias entre ellos. Se optó por realizar una transformación de semejanza empleando como referencia una de las nubes de puntos obtenidas a partir de PhotoScan ya orientadas en el sistema local, con el software CloudCompare. Se exportaron luego los vértices de la malla como puntos en un fichero TXT.

Se generaron así un total de seis nubes de puntos.

Los resultados no han sido satisfactorios: en varios de los modelos (1, 5) se observan deformaciones en la zona superior de la bandeja (Figura 4.1); en otros la deformación se produce en la esquina inferior izquierda (2, 3), y en uno de los casos el modelo obtenido presenta además de deformaciones una baja densidad de puntos (0) (Tabla 4.1). Se descartan estas nubes de puntos.

3.6.3 Procesamiento de nubes de puntos láser

El láser escáner ScanStation2 es gestionado por el software Leica Cyclone™-SCAN; los datos se guardan en el formato de la base de datos de objetos Cyclone native IMP. Este software ofrece exportación directa de los datos de puntos a formatos ASCII (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT) y DXF, entre otros.

Para el tratamiento y comparación de las nubes de puntos se emplearán programas como CloudCompare, ArcMap, y otros, por lo que será necesario transformar las nubes de puntos a un formato compatible con ellos. Se opta por el formato PTX, con la información [X Y Z Intensidad R G B] de cada punto.

En primer lugar, se exportaron desde Leica Cyclone los escaneos originales al formato PTX y se guardaron como nubes de puntos iniciales. Estas nubes de puntos no tienen ningún tratamiento ni transformación geométrica, están en un sistema de referencia local con origen en el centro del escáner y unidades en metros, y corresponden todas a la misma zona, pues se tomaron con el escáner en la misma posición, sin variar los ajustes de selección de la zona y resolución.

Las restantes operaciones sobre las nubes de puntos se realizaron con el programa CloudCompare. Se importaron las nubes de puntos originales a partir de los ficheros en formato PTX, totalmente compatible.

Para la comparación posterior es necesaria una orientación absoluta de las nubes de puntos láser al sistema de referencia local empleado en los MDE obtenidos a partir de las imágenes. Se utilizaron los mismos puntos de coordenadas conocidas que en la referenciación de las imágenes. La transformación geométrica aplicada es una transformación de semejanza tridimensional, con siete parámetros (tres traslaciones T_x, T_y, T_z , tres giros ω, ϕ, κ y una homotecia H). Utilizando coordenadas homogéneas, la transformación obtenida se puede expresar como una matriz de 4x4, en la cual la submatriz 3x3 superior izquierda corresponde a la rotación y la homotecia, y los tres primeros componentes de la última columna representan las traslaciones.

Se orientó una nube de puntos láser con respecto a la nube de puntos del MDE5 de Photoscan (Figura 3.21), utilizando las señales de

coordenadas conocidas ubicadas en el simulador y la bandeja, visibles claramente si se representan los puntos en función de su intensidad. La matriz de transformación obtenida se empleó para aplicar la misma transformación geométrica al resto de las nubes láser originales, todas ellas en la misma posición inicial.

A continuación se segmentaron las nubes de puntos para eliminar todos aquellos puntos correspondientes a objetos situados alrededor y detrás del simulador (Figura 3.22a). Se dejó solamente la nube de puntos correspondiente a la bandeja para cada escaneo (Figura 3.22b).

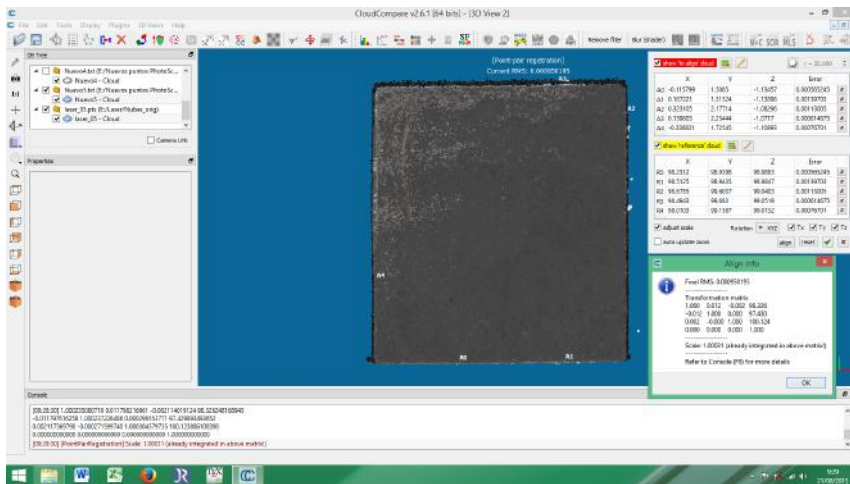


Figura 3.21: CloudCompare: Orientación de la nube de puntos láser en el sistema de referencia local

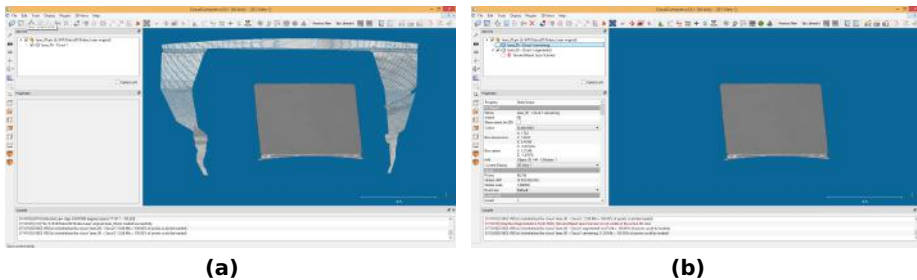


Figura 3.22: CloudCompare: Segmentación de las nubes de puntos: **(a)** Nube de puntos inicial; **(b)** Nube de puntos segmentada final

Por último se realizó un filtrado para eliminar el ruido de la nube de puntos, necesario cuando se realizan escaneos con una resolución muy próxima a la precisión por punto. Los algoritmos automáticos de eliminación del ruido se pueden considerar básicamente un filtro de paso bajo: se ajusta localmente un plano a los puntos en el entorno de un punto de la nube; el punto central se elimina si la distancia al plano es excesiva. Además suelen considerar que un punto con pocos o ningún punto a su alrededor es ruido, y por tanto lo eliminan (Lerma *et al.*, 2008). El filtro de ruido de Cloud Compare sigue este modelo; se ofrece la posibilidad de ajustar los parámetros adecuados. El usuario puede:

- Elegir entre extraer un número dado de vecinos alrededor de cada punto (adecuado para nubes de densidad constante), o especificar el radio de una esfera alrededor de cada punto en la que se buscarán puntos vecinos (la esfera ha de ser lo bastante grande para capturar al menos 6 puntos).
- Introducir un error máximo (distancia del punto al plano ajustado) para decidir si el punto se rechaza o no. El error puede ser relativo (como factor del error de reproyección de los vecinos en el plano ajustado) o absoluto.
- Decidir si los puntos aislados (i.e. menos de 3 vecinos en la esfera) se pueden eliminar durante el proceso.

Los parámetros que se establecieron para el filtrado de las nubes de puntos, que presentaban un ruido elevado, fueron:

- Número de puntos vecinos: 10
- Error máximo relativo: 0.5
- Eliminar puntos aislados: sí

En el filtrado se eliminaron aproximadamente un 60% de los puntos iniciales. Las nubes de puntos resultantes tras el filtrado se exportaron a un formato ASCII de puntos con extensión TXT, que guarda para cada punto [X Y Z Intensidad].

3.6.4 Obtención de MDE ráster a partir de las nubes de puntos

Las nubes de puntos obtenidas se utilizarán para generar los correspondientes MDE ráster en ArcMap.

Un MDE ráster o *grid* es una estructura de datos espacial que define el espacio como una matriz de celdas de igual tamaño distribuidas en filas y columnas. Cada una de las celdas contiene un atributo que representa el valor en Z. La localización de la celda en el espacio se obtiene a partir de su posición relativa al origen de la matriz. Este modelo de elevaciones es ampliamente utilizado, y sobre él se ha basado la mayor parte de la investigación actual sobre el error y la incertidumbre; Fisher y Tate (2006) realiza un completo análisis de las causas de error en un MDE y recopila las referencias relacionadas actuales más destacadas.

Los errores en los MDE y en sus productos derivados pueden clasificarse en tres grandes grupos: errores groseros, errores sistemáticos y errores aleatorios (Butler *et al.*, 1998; Wise, 2000; Cuartero *et al.*, 2001; Reuter *et al.*, 2009; Fisher y Tate, 2006; Florinsky, 2012). Los errores groseros o *blunders*, de naturaleza local, suelen ser consecuencia de errores del usuario o fallos en el instrumental, y son fácilmente detectables y eliminables. Los errores sistemáticos, de naturaleza global, introducen sesgos causados por el método de recolección de datos y sus limitaciones, i.e., la aparición de falsas terrazas en MDE derivados a partir de curvas de nivel (Reuter *et al.*, 2009), y por tanto afectan a la exactitud de los datos finales. Los errores aleatorios, también de naturaleza global, son inherentes a cualquier sistema de medición, y existirán en todas las operaciones que se realizan para obtener el MDE final (Wise, 2000; Fisher y Tate, 2006); introducen desviaciones en los datos no sistemáticas que siguen una distribución Gaussiana (Cuartero *et al.*, 2001), y pueden reducir la precisión de los datos. Por tanto son estos errores aleatorios los que se estudian y a los que se hace referencia en lo sucesivo.

La calidad de los MDE obtenidos depende de varios factores, como el método empleado para la obtención de los datos altimétricos, la densidad de remuestreo, la resolución de la malla, o el algoritmo de interpolación empleado, entre otros (Reuter *et al.*, 2009).

Hay distintas maneras de cuantificar los errores en un MDE. Un posible enfoque es la denominada predicción por producción: se evalúan los posibles errores introducidos en las etapas de producción junto con una evaluación de la precisión vertical de los datos iniciales. La exactitud del MDE será el resultado de la concatenación de los errores en las distintas etapas (Li *et al.*, 2005).

Uno de los métodos estándar para determinar el error de un MDE es especificar los errores de elevación en el plano vertical, comparando la elevación de un punto de referencia con su elevación en el MDE. Los puntos de referencia deben estar distribuidos de manera uniforme a través del área de interés, ser representativos de la superficie y tener una precisión superior a la del MDE (Reuter *et al.*, 2009).

Si se considera que los errores presentan una distribución Gaussiana y los datos no contienen *outliers* o valores atípicos, entonces se pueden emplear los estadísticos siguientes en la caracterización del error (Webster y Oliver, 2007; Höhle y Höhle, 2009; Fisher y Tate, 2006; Reuter *et al.*, 2009; Li y Chen, 2012):

$$\text{Error medio: } EM = \frac{1}{n} \sum_1^n \Delta z_i \quad (3.6)$$

$$\text{Error medio cuadrático: } EMC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \Delta z_i^2} \quad (3.7)$$

$$\text{Desviación típica: } SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\Delta z_i - EM)^2} \quad (3.8)$$

siendo Δz_i la diferencia entre la elevación de un punto i en el MDE y su elevación real. La desviación típica (SD) coincide con el error medio cuadrático (EMC) cuando la distribución no es sesgada.

El error en la determinación de las coordenadas Z de la nube de puntos depende del procedimiento de adquisición empleado. En el caso de los puntos obtenidos por métodos fotogramétricos, la precisión teórica obtenida en la determinación de la profundidad Z viene dada por la ecuación 3.1. En el levantamiento con láser escáner estará determinada por las características técnicas del escáner y la distancia

al objeto. La determinación del error obtenido se realiza empleando un conjunto de puntos de referencia de precisión superior al MDE, como se ha indicado más arriba.

La transformación geométrica aplicada a las nubes de puntos para referenciarlas al sistema de referencia local es una de las operaciones que introduce un error a tener en cuenta. La transformación aplicada es una transformación de semejanza tridimensional, calculada mediante un ajuste mínimo-cuadrático a partir de los puntos de apoyo establecidos, de precisión superior a la de los puntos de la nube (anexo B). Se considera que el error introducido por la transformación es el error medio cuadrático obtenido para los puntos de apoyo empleados en el ajuste.

Estos errores están relacionados con la exactitud con la que los puntos medidos representan las elevaciones reales, y dependen del método específico de generación de los datos; se pueden ver como errores basados en los datos (Fisher y Tate, 2006). Otro tipo de errores son los derivados de la interpolación empleada para la obtención del MDE a partir de los datos medidos; son errores basados en el modelo, que centran su atención en la capacidad del MDE de aproximarse a la superficie definida por los datos.

En Geomorfometría, la principal preocupación es la precisión de los resultados (parámetros y objetos) y no la precisión absoluta de las elevaciones medidas. [...] Para análisis geomorfométricos de alta calidad, es más importante que un MDE se asemeje con precisión las formas reales y los procesos de flujo/deposición de la superficie terrestre. Esta semejanza es a menudo referida como la precisión relativa o precisión geomorfológica de un MDE. (Reuter *et al.*, 2009)

En este trabajo, el objetivo es comparar entre sí superficies obtenidas a partir de datos generados mediante el mismo método y de igual calidad. El interés se centra en la precisión relativa obtenida en la determinación de la superficie. Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, se considera que el error del MDE obtenido será la composición (Li *et al.*, 2005) del error obtenido durante la georreferenciación, E_T , y el error de interpolación del MDE, E_I . Siguiendo la teoría de propagación de errores (Chueca Pazos *et al.*, 1996), se considera que el error total del MDE es la composición cuadrática de los errores considerados:

$$E_{MDE} = \sqrt{E_T^2 + E_I^2} \quad (3.9)$$

La interpolación es el procedimiento empleado para predecir los valores de las celdas en aquellas localizaciones para las que no hay puntos muestrales. Se basa en el principio de la autocorrelación espacial o dependencia espacial, que mide el grado de relación entre los valores en puntos cercanos y distantes, y determina si los valores están interrelacionados. Se pueden establecer dos categorías de métodos de interpolación: determinísticos y geoestadísticos. Las técnicas de interpolación determinísticas crean superficies a partir de los puntos medidos basándose en el grado de la similitud (por ejemplo, la ponderación por la distancia inversa, IDW) o en el grado de suavizado (por ejemplo, los splines o funciones de base radial) (Erdogan, 2009). Los métodos geoestadísticos cuantifican la autocorrelación espacial entre los puntos medidos y reflejan la configuración espacial de los puntos de muestra en torno a la ubicación de predicción; son adecuados cuando la variación del atributo interpolado es irregular y la densidad de la muestra es baja, y los métodos simples de interpolación proporcionan predicciones poco fiables (Burrough y McDonnell, 1998; ESRI, 2004). Los métodos de interpolación se pueden también clasificar en globales y locales. En los globales se usan todos los datos iniciales para determina una única función que proporcione los valores interpolados a toda la zona de interés, mientras que los locales operan en una pequeña zona alrededor del punto que se va a interpolar, determinando el valor interpolado a partir de los datos del entorno inmediato del punto (Burrough y McDonnell, 1998).

En este caso se ha optado por los métodos determinísticos locales, que emplean directamente la información de los puntos más cercanos. Algunos de los métodos más habituales son *Inverse Distance Weighted*, *Natural Neighbor*, y los basados en *splines*.

El algoritmo IDW (*Inverse Distance Weighted*) determina los valores de las celdas utilizando una combinación lineal ponderada de un conjunto de puntos de muestra. El peso asignado es función de la distancia de un punto a la celda considerada; cuanto mayor sea la distancia, menor será la influencia del punto en el valor resultante (ESRI, 2004; Erdogan, 2009).

El algoritmo NN (*Natural Neighbor*) se basa en una división en polígonos de Thiessen; encuentra el subconjunto de puntos de muestra más cercano al punto considerado y les aplica pesos basados en áreas proporcionales (Sibson, 1981; ESRI, 2012). Es un algoritmo local que usa solo un subconjunto de muestras alrededor del punto interpolado y obtiene valores interpolados que están dentro del rango de las muestras usadas (Webster y Oliver, 2007).

Los algoritmos basados en splines, también llamados Funciones de Base Radial, se basan en funciones matemáticas que minimizan la curvatura total de la superficie (Burrough y McDonnell, 1998; Erdogan, 2009); el resultado es una superficie suavizada que pasa exactamente por los puntos de muestra. Son adecuados para representar superficies que presentan una variación suave, como la temperatura (ESRI, 2012).

Liu *et al.* (2011) realizan una comparativa del nivel de precisión de los distintos métodos de interpolación sobre superficies matemáticas discretizadas sobre las que se introducen errores aleatorios, concluyendo que IDW y NN son los métodos que presentan mayor robustez frente a la presencia de errores en los datos iniciales, aplican un suavizado menor a los datos iniciales y obtienen mejor precisión, frente a los métodos de interpolación basados en splines. Sin embargo, en general no parece haber un único método de interpolación que sea el más preciso para la interpolación de elevaciones. La adecuación de un determinado método de interpolación depende de la naturaleza de la superficie del terreno y de la distribución de los datos medidos, y es difícil extraer conclusiones generales (Fisher y Tate, 2006). En este trabajo se considera inicialmente más adecuado el método de interpolación IDW, pues se precisa una superficie poco suavizada, que mantenga las variaciones locales, para poder analizar los cambios.

Existen diversos métodos de validación que se aplican para cuantificar la cantidad y distribución del error introducido por la interpolación y valorar la precisión del MDE. En el caso de los métodos determinísticos, si se emplean para la validación los mismos puntos que se han empleado para la interpolación de la superficie se obtendrán unos errores de predicción demasiado optimistas. Por esta razón, se evalúa la precisión mediante procedimientos de validación estándar que omiten algunos datos iniciales durante el procedimiento de interpolación y valoran luego el resultado obtenido con respecto a esos datos omitidos, de valores conocidos. Hay una serie de técnicas que

utilizan este principio, como la validación cruzada o *cross-validation*, y la validación con muestras divididas o *split-sample validation*, también llamado *true validation*. La validación cruzada utiliza todos los datos iniciales para estimar la superficie estadística mediante el método de interpolación seleccionado. Se eliminan los puntos iniciales, uno cada vez, y se predice el valor para esa posición. Se comparan para ese punto el valor inicial y el valor calculado; se repite para un segundo punto, y así sucesivamente hasta comparar todos los puntos iniciales. De este modo, la validación cruzada compara los valores medidos y los valores interpolados, y proporciona los valores estadísticos descriptivos que indican si el modelo es adecuado o no. Esta técnica se suele emplear para obtener una estimación previa de la adecuación del modelo de interpolación sobre el conjunto de datos iniciales y la bondad de las predicciones obtenidas. En el método de validación con muestras divididas se divide la muestra de datos iniciales en dos subconjuntos de puntos, se realiza la interpolación del MDE con uno de los subconjuntos, y se calcula luego la diferencia entre los valores interpolados y los valores medidos del subconjunto de puntos omitidos (puntos de control). Los estadísticos básicos (ecuaciones 3.6 a 3.8) de esta diferencia caracterizan el resultado de la interpolación (Smith *et al.*, 2005; Erdogan, 2009) y su precisión.

En este trabajo se empleará la validación cruzada para la selección del método de interpolación adecuado, y la validación con muestras divididas para la obtención de la precisión alcanzada en el MDE interpolado.

Se detalla a continuación el procedimiento seguido en la elaboración de un MDE a partir de una nube de puntos. Se procesaron del mismo modo todas las nubes.

En primer lugar se importó la nube de puntos en formato TXT como una nueva capa de eventos x, y . Se establecieron los campos del fichero de puntos que corresponden a las coordenadas X, Y, Z (las tres primeras columnas).

A continuación se guardó la capa de eventos como una capa de elementos (*shape*) de tipo punto. Se tiene así una nube de puntos ubicados según sus coordenadas X, Y que tienen como atributo la coordenada Z .

A partir de esta nube de puntos se creará mediante interpolación un MDE del suelo contenido en la bandeja.

Se emplearon las herramientas geoestadísticas de ArcMap para realizar una valoración de los resultados de los distintos métodos de interpolación sobre las nubes de puntos. Se generó un modelo geoestadístico a partir de la nube entera puntos, definiendo el método de interpolación y sus parámetros, y se aplicó una correlación cruzada, obteniendo los estadísticos de la diferencia entre la superficie generada y la nube de puntos. Se analizaron dos métodos, IDW y RBF, confirmando los resultados obtenidos la elección inicial del método IDW.

Así pues, el método de interpolación elegido fue IDW. Para poder evaluar la calidad de los MDE que se van a generar se aplicó la técnica de muestras divididas. La nube de puntos original se dividió en dos partes: una, la muestra, se empleó para producir la superficie, y la otra, mucho más pequeña, el control, se usa posteriormente para comparar y validar la superficie obtenida. La asignación de los puntos a uno u otro subconjunto se realizó de forma aleatoria. Se estableció un conjunto de validación para cada nube original del 5% de los puntos totales.

Se generaron los MDE mediante el método de interpolación IDW a partir del subconjunto de muestra obtenido en el paso anterior, estableciendo una resolución de 1 mm para la malla ráster. La extensión correspondiente a los MDE se delimitó de forma que los bordes metálicos de la bandeja, más elevados que el suelo que contiene, quedaran fuera y no afectaran a los resultados; se estableció como zona de interés un rectángulo de dimensiones 0.71 x 0.65 m, que corresponde a la parte interior de la bandeja (de dimensiones totales 0.75 x 0.68 m). Las esquinas de este rectángulo, expresadas en coordenadas en el sistema local, se emplearon para definir la extensión de los modelos ráster generados en ArcMap.

Se evaluó el ajuste de los MDE a los puntos del subconjunto test para cada método de interpolación (Figura 3.23). Se extrajo el valor de Z del MDE para los puntos del conjunto test y se comparó con su Z inicial, obteniendo así el error en Z. Se generaron los estadísticos básicos de este nuevo valor.

Por último se determinó el error total de cada MDE según la ecuación 3.9.

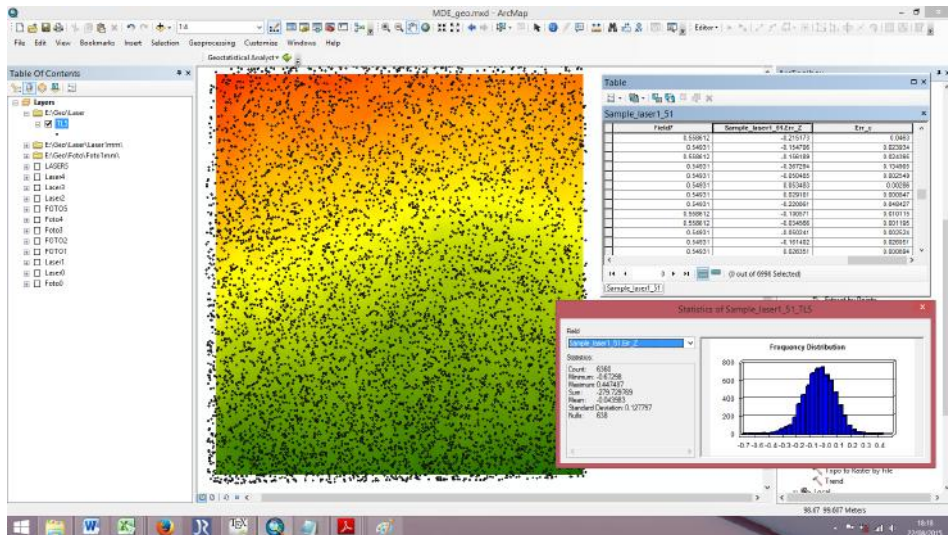


Figura 3.23: ArcMap: Obtención del error de interpolación del MDE

3.7 Comparación nubes de puntos láser y fotogramétricas

Se realizó una comparación entre las nubes de puntos obtenidas a partir de imágenes y las correspondientes al láser escáner para cada momento, con el fin de obtener la distancia entre ellas. Se empleará la nube láser como referencia; las distancias entre esta nube de referencia y la nube de puntos foto será un indicador de la exactitud obtenida en la modelización del terreno a partir de las imágenes.

Para medir las diferencias entre las nubes de puntos 3D, se realizó previamente una alineación de las nubes empleando el algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) (Nouwakpo *et al.*, 2014). El propósito del registro ICP es asegurar que cualquier desalineación sistemática existente entre las nubes de puntos no influya en la comparación. Puesto que las nubes de puntos ya están en el mismo sistema de coordenadas, esta alineación debe dar como resultado valores muy pequeños de traslaciones y giros.

Se empleó el programa CloudCompare para realizar tanto la alineación como la comparación directa de nubes de puntos. Este método es

la forma más simple y rápida de comparar nubes de puntos y no requiere obtener previamente superficies mediante un mallado de los puntos (Lague *et al.*, 2013). Para cada punto de la nube de puntos comparada se busca el punto más cercano en la nube de referencia y se calcula su distancia (Girardeau-Montaut, 2014). Se empleó el algoritmo *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2), diseñado para la medición ortogonal de distancias entre dos nubes de puntos; este algoritmo tiene en cuenta la rugosidad local de las nubes de puntos y calcula las normales a una escala consistente con dicha rugosidad local, reduciendo así su influencia y proporcionando un método robusto respecto a cambios en la densidad de los puntos y ruido de la nube de puntos (Lague *et al.*, 2013). Se obtuvieron las diferencias entre nubes de puntos láser y nubes de puntos foto, para cada uno de los momentos temporales del experimento.

3.8 Diferencias entre MDE

La detección y cuantificación de cambios geomorfológicos en el tiempo se puede realizar a través de la comparación de las superficies o MDE correspondientes a cada momento temporal, los llamados *DEM of Difference* o DoD.

Una vez obtenidos los MDE correspondientes a las nubes de puntos de cada episodio de lluvia, se realiza la diferencia entre ellos para obtener las diferencias de volumen y relacionarlas con la cantidad de sedimentos arrastrados y depositados.

El objetivo es clasificar la parcela experimental en tres zonas:

- zona de erosión,
- zona de deposición, y
- zona sin cambio o neutra

y cuantificar el volumen que cada una de ellas representa.

En la estimación de la variación neta en términos de erosión y deposición de sedimentos deducidos morfológicamente es fundamental la calidad de los MDE empleados: "The basic question [is] that, given the uncertainty inherent in individual DEMs, is it possible

to distinguish real geomorphic changes from noise?"(Wheaton *et al.*, 2010).

En el ámbito del análisis geomorfológico, existen varias técnicas de detección de cambios basadas en DoD: aplicar un nivel mínimo de detección; obtener un umbral probabilístico; considerar la variabilidad espacial del error a partir de múltiples parámetros; o evaluar la coherencia espacial de la erosión y la deposición (Williams, 2012).

En este trabajo se empleará el primero de los métodos citados: se especifica un nivel mínimo de detección LOD_{min} (*minimum Level Of Detection*) basado en el error de los MDE para distinguir los cambios reales del error de la superficie.

Una estimación básica del error en la diferencia de dos MDE es la composición cuadrática de los errores en cada uno de los MDE comparados (Lane *et al.*, 2003; Wheaton *et al.*, 2010; Williams, 2012; Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2014b):

$$E_{DoD_{1-2}} = \sqrt{E_{MDE_1}^2 + E_{MDE_2}^2} \quad (3.10)$$

Conocidos E_{MDE_1} , E_{MDE_2} , la ecuación 3.10 se puede aplicar de forma global, suponiendo $E_{MDE_1} = E_{MDE_2}$ (o $E_{MDE_1} \neq E_{MDE_2}$ en el caso de MDE obtenidos con distintos métodos), o de forma local si se conoce la variación espacial del error de cada uno de los MDE (Lane *et al.*, 2003). En este trabajo se asume que el error en los MDE sigue una distribución espacial uniforme.

Para aplicar el nivel mínimo de umbral de detección (LOD_{min}), se emplea el valor de E_{DoD} como un umbral constante a la diferencia de MDE calculada Williams (2012):

$$LOD_{min} = E_{DoD} \quad (3.11)$$

Las diferencias de elevación de valor superior a este umbral se consideran fiables; las que estén por debajo se consideran ruido. Cuanto mayor sea la incertidumbre de los MDE, mayor será la información descartada. No es posible detectar de manera fiable cambios de elevación dentro del intervalo establecido por $[-LOD_{min}, +LOD_{min}]$ (Wheaton *et al.*, 2010).

En este trabajo se obtuvieron las diferencias entre MDE correspondientes a momentos sucesivos para determinar la variación de volumen producida, y se aplicó el nivel de umbral mínimo de detección, obtenido a partir de la ecuación 3.10, para clasificar las diferencias en términos de erosión y deposición.

Se ha diseñado una herramienta propia en ArcMap, llamada *DEM Difference* (Figura 3.24), para automatizar la obtención de los mapas de diferencias y la reclasificación de los resultados.

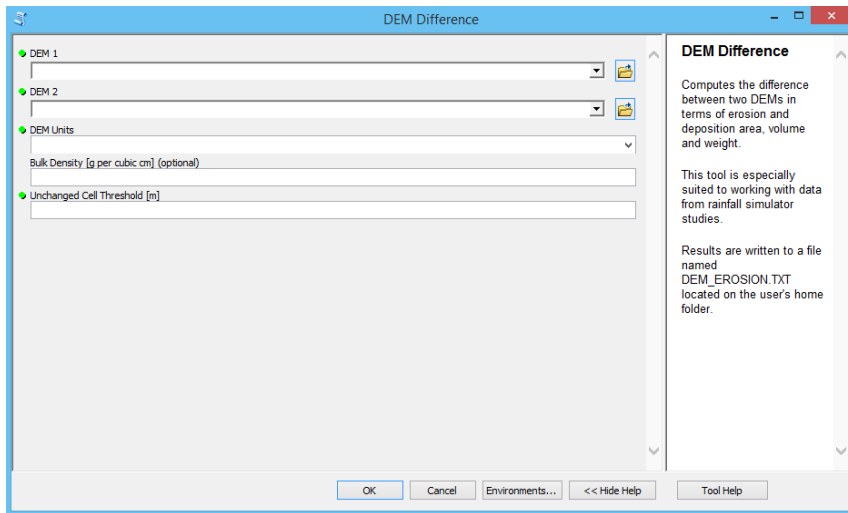


Figura 3.24: ArcMap: Herramienta DEM Difference

Descripción de la herramienta DEM Difference:

La herramienta recibe 5 parámetros de entrada:

- *DEM1*: MDE inicial (previo a la lluvia).
- *DEM2*: MDE final (posterior a la lluvia).
- *DEM units*: Unidades del MDE en XYZ (m, cm o mm).
- *Bulk Density*: Densidad aparente del suelo en g/cm³.
- *Unchanged Cell Threshold*: Umbral para el incremento de Z en el que se considera que no hay cambio significativo.

Procedimiento:

Los MDE inicial y final han de tener la misma extensión y el mismo número de filas y columnas. Se calcula la resta, celda a celda, de la superficie final menos la superficie inicial. Se obtiene un mapa ráster de diferencias, en el que los valores negativos corresponden a zonas de erosión y los positivos a zonas de deposición.

A continuación se realiza una reclasificación del mapa de diferencias, asignando nuevos valores: 1 a los píxeles con diferencia positiva (deposición), -1 a los píxeles con diferencia negativa (erosión) y 0 a los píxeles con diferencia nula (neutro).

Las zonas neutras se han definido convirtiendo a cero todas aquellas diferencias dentro del intervalo definido por el umbral LOD_{min} determinado $[-LOD_{min}, +LOD_{min}]$, definido en el parámetro de entrada *Unchanged Cell Threshold*. Por ejemplo, introduciendo 0.5 mm como valor del parámetro, todas las diferencias dentro del intervalo $[-0.5 \text{ mm}, +0.5 \text{ mm}]$ se reclasificarán como valor neutro 0.

Una vez obtenido un mapa ráster con las tres nuevas clases (erosión, sin cambio y deposición), se realiza un recuento del número de celdas de cada clase, y se calculan los siguientes valores para las clases erosión y deposición:

- Área (en m^2): se multiplica el n° de celdas de cada clase por la superficie de la celda del mapa ráster (dada por la resolución).
- Volumen (en cm^3): se multiplica la suma de todas las diferencias (columna de erosión o deposición) por la superficie de la celda del mapa ráster.
- Peso (en gramos): se multiplica el volumen en cm^3 por la densidad aparente en g/cm^3 .

Una vez calculados los pesos de erosión y deposición se calcula la erosión neta como la resta de estos dos valores.

La herramienta produce como resultado un conjunto de ficheros:

- Fichero de texto DEM_#.TXT almacenado en la carpeta inicial (HOME) del usuario con el informe sobre el número de celdas de cada clase, el volumen correspondiente y el peso calculado a partir del valor de densidad aparente (Figura 3.25).
- Fichero ráster DEM_#.ASC correspondiente a la diferencia de MDE (Figura E.9).

- Fichero ráster DEM_#C.ASC correspondiente a la reclasificación de la diferencia de MDE (Figura E.11) .

Se empleó la herramienta DEM Difference en ArcMap para generar las diferencias entre MDE y valorar los resultados en términos de erosión o deposición.

Se realizaron en primer lugar las diferencias entre MDE sin tener en cuenta ningún umbral de detección mínimo, con el fin de poder tener luego una estimación de la magnitud de los cambios descartados.

A continuación se obtuvieron las diferencias entre MDE estableciendo un umbral minLOD calculado a partir del error considerado en cada uno de los MDE según la ecuación 3.9.

Por último se representaron gráficamente los mapas ráster correspondientes a los DoDs obtenidos, y se tabularon los resultados cuantitativos de volumen de erosión y deposición de cada uno, determinando las tendencias y relaciones entre ellos.


```

d_0068.txt
[2015/08/19 00:40:09]

DEM_0: E:\DEMs\DEM1mm\Foto1mm\f1_idw4
DEM_1: E:\DEMs\DEM1mm\Foto1mm\f1_idw5

Statistics for erosion cells

Min: -0.002892
Max: -0.001144
Mean: -0.001422
Sum: -42.46

Statistics for deposition cells

Min: +0.001144
Max: +0.001495
Mean: +0.001214
Sum: +1.14

Statistics for unchanged cells

Min: -0.001137
Max: +0.001137
Mean: -0.000247
Sum: -106.38

Bulk density: 1.43

Unchanged cells threshold: [-0.00114180986,0.00114180986]

      #Cells   Area   Volume   Weight
      [n]     [m2]   [cm3]   [gr]
-----
Erosion      29850    0.0    -42.5   -60.7
Unchanged   430707    0.4
Deposition     943    0.0     1.1    1.6

Net erosion: -59.1 grams

Output rasters

Raw differences: C:\Users\mati\d_0068.asc
Class differences: C:\Users\mati\d_0068c.asc

```

Figura 3.25: Ejemplo de informe generado por la herramienta DEM Difference

Capítulo 4

Resultados y discusión

Bien acierta quien sospecha que siempre yerra.

Francisco de Quevedo

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las sucesivas etapas del trabajo. Se realizará una discusión de dichos resultados comparándolos con trabajos previos similares.

En primer lugar se analizan las características de las nubes de puntos obtenidas mediante escáner láser y mediante fotogrametría. Se muestran los resultados de la orientación absoluta de las nubes de puntos para su transformación a un sistema de referencia local común. Se presentan los resultados de la comparación de distancias entre las nubes de puntos láser y fotogramétricas correspondientes a los mismos momentos de la simulación de lluvia.

A continuación se analiza la precisión de los MDE obtenidos a partir de interpolación sobre las nubes de puntos.

Se presentan los resultados de las diferencias entre MDE y se comparan con los resultados de sedimento recogido durante la simulación de lluvia, analizando la relación entre ellos.

Por ultimo, se realiza una valoración crítica de los programas empleados.

4.1 Nubes de puntos obtenidas

Se presentan en primer lugar los resultados referentes a la obtención de las nubes de puntos para la posterior obtención de los MDE.

Las nubes de puntos se obtuvieron de dos maneras: de forma directa con un escáner láser, y de forma indirecta por procedimientos fotogramétricos a partir de imágenes.

El escáner láser proporcionó directamente las coordenadas XYZ de los puntos de la zona escaneada. Al tratarse de una zona tan pequeña, la realización del levantamiento se simplificó mucho: se escaneó toda la bandeja desde una posición y no fue necesario realizar varios estacionamientos; se emplearon los mismos parámetros en todos los escaneos; el tiempo empleado en cada escaneado fue corto, inferior a 5 minutos.

En la obtención de puntos a partir de imágenes se emplearon dos programas distintos: Agisoft PhotoScan y AutoDesk 123DCatch.

Con PhotoScan se realizó de forma automática la orientación de las imágenes y la obtención de una nube densa de puntos XYZ, que se exportó directamente a un fichero de intercambio XYZ.

El programa 123DCatch realizó automáticamente la orientación de las imágenes y la generación de una malla tridimensional. No se ofrece la opción de exportar las nubes de puntos empleadas para generar la malla, así que se exportó la malla en formato de intercambio OBJ, y posteriormente desde CloudCompare se extrajeron los vértices de la malla como nube de puntos en formato XYZ.

Se obtuvieron tres conjuntos de nubes de puntos, uno por cada método de obtención (láser, PhotoScan, 123DCatch); cada conjunto está formado por seis nubes de puntos, correspondientes a cada uno de los momentos temporales considerados:

- Momento 0: antes del primer episodio de lluvia.
- Momento 1: tras el primer episodio de lluvia, de 15 minutos de duración.
- Momento 2: tras el segundo episodio de lluvia, de 30 minutos de duración.

- Momento 3: tras el tercer episodio de lluvia, de 60 minutos de duración.
- Momento 4: tras el cuarto episodio de lluvia, de 60 minutos de duración.
- Momento 5: tras el quinto episodio de lluvia, de 60 minutos de duración.

Las nubes de puntos y los modelos se numeraron siguiendo esta secuencia.

Se muestran en la Tabla 4.1 las características de las nubes de puntos obtenidas para cada momento con los tres métodos empleados: escáner láser, PhotoScan y 123DCatch. Se indica el número de puntos de la nube correspondiente a la bandeja de suelo (una vez excluidas las zonas sin interés), y se calcula la densidad y espaciado de los puntos en función de la superficie de la zona, 0.5 m^2 .

Tabla 4.1: Características de las nubes de puntos obtenidas

		Nº puntos	Puntos/m²	Espaciado (m)
Láser	Nube 0	115578	231156	0.0029
	Nube 1	107821	215642	0.0030
	Nube 2	108751	217502	0.0030
	Nube 3	115834	231668	0.0029
	Nube 4	114860	229720	0.0030
	Nube 5	139963	279926	0.0027
PhotoScan	Nube 0	620136	1240272	0.0013
	Nube 1	746967	1493934	0.0012
	Nube 2	747344	1494688	0.0012
	Nube 3	779508	1559016	0.0011
	Nube 4	741073	1482146	0.0012
	Nube 5	750096	1500192	0.0012
123DCatch	Nube 0	21598	43196	0.0068
	Nube 1	98163	196326	0.0032
	Nube 2	20538	41076	0.0070
	Nube 3	99150	198300	0.0032
	Nube 4	85044	170088	0.0034
	Nube 5	15376	30752	0.0081

Se puede observar que las nubes de puntos de mayor densidad son las obtenidas con el programa PhotoScan, con un número de puntos aproximadamente 6 veces mayor que las nubes láser.

Por otro lado, el programa 123DCatch ofreció resultados irregulares. Se realizaron los modelos 3D empleando las mismas imágenes que en PhotoScan. Al bajo número de puntos obtenidos, que oscila entre el 3% y el 10% de los puntos obtenidos por PhotoScan, se suma el hecho de que en algunos casos las mallas generadas presentan zonas dobles y deformaciones (Figura 4.1); el usuario tiene poca capacidad para tratar de corregir estos resultados, aún utilizando una de las (pocas) herramientas que ofrece el programa y marcando manualmente puntos de paso en las imágenes para mejorar la orientación. Se descartan pues estas nubes de puntos, puesto que las zonas con deformaciones distorsionarán los resultados de las diferencias entre modelos.

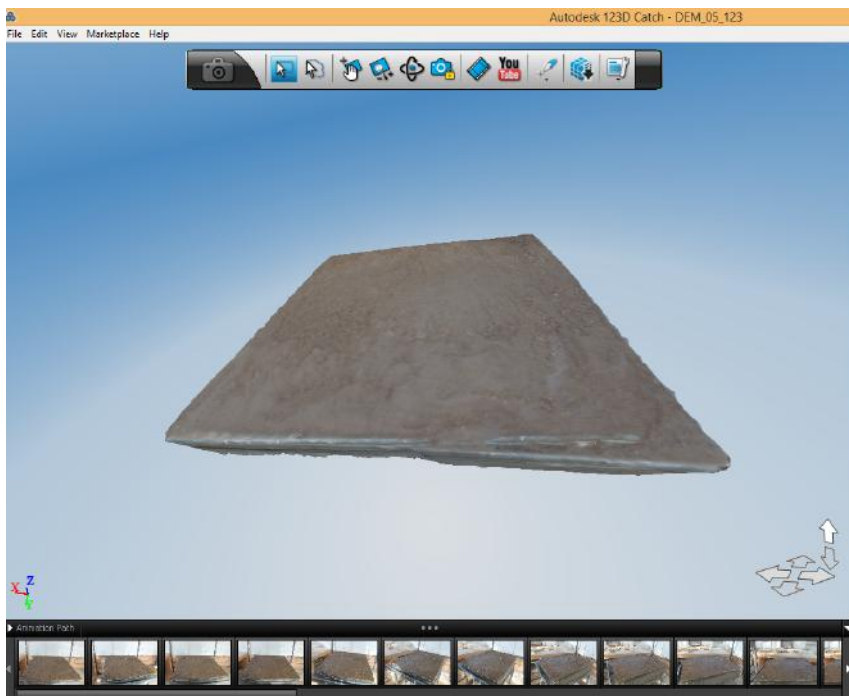


Figura 4.1: 123DCatch: zona doble (esquina inferior derecha) en la malla generada

En adelante se emplearán las nubes de puntos láser y las nubes de puntos de PhotoScan.

4.2 Orientación absoluta de las nubes de puntos

La orientación absoluta de los conjuntos de nubes de puntos se realizó con el fin de tener todas las nubes a la misma escala y en la misma posición espacial y poder realizar comparaciones entre ellas.

En el caso de las nubes generadas a partir de imágenes, la orientación absoluta es necesaria, pues en principio la orientación de las imágenes es arbitraria, obteniéndose un modelo relativo que necesita posteriormente al menos un escalado para obtener dimensiones reales. En este trabajo, la posición espacial XY no era relevante, pero sí que se necesitaba establecer el eje Z coincidente con la vertical, puesto que la erosión se mide respecto de la vertical. Se estableció un sistema de coordenadas local con ejes X,Y paralelos a los lados de la bandeja del simulador y eje Z coincidente con la vertical del lugar, materializado mediante señales sobre el simulador que se midieron mediante topografía clásica (Anexo B). La referenciación de las nubes de puntos a este sistema puede hacerse a posteriori, obteniéndolas primero con una orientación y escala arbitrarias y aplicando luego una transformación calculada a partir de los puntos de apoyo, o puede obtenerse la orientación de las imágenes ya en el sistema de referencia deseado, si el programa empleado ofrece esta opción. El programa PhotoScan permite establecer un sistema de referencia a través de puntos de coordenadas conocidas, que se miden en las imágenes.

Se emplearon los puntos señalizados sobre el simulador y la bandeja para definir el sistema de referencia y obtener las orientaciones de las imágenes y las coordenadas XYZ de los puntos de la nube directamente en dicho sistema. De esta forma, las seis nubes de puntos obtenidas están registradas con respecto al mismo sistema. Los resultados de la transformación para cada nube se pueden ver en los informes generados por PhotoScan (Anexo D). El EMC total obtenido varía entre 0.516 mm y 0.803 mm, con un valor medio de 0.654 mm; para la coordenada Z varía entre 0.033 mm y 0.269 mm, con un valor medio de 0.173 mm. Son valores satisfactorios, con una precisión inferior a 1 mm en todos los casos; la precisión en Z está dentro del valor a priori de 0.5 mm establecido en el apartado 3.3.1.

Las nubes láser iniciales están correctamente referenciadas entre ellas y a la misma escala, puesto que se obtienen desde la misma estación. La orientación absoluta es necesaria si se quiere comparar las nubes láser con las nubes foto. Se suelen emplear dos métodos para registrar nubes de puntos: el primero emplea técnicas de correspondencia entre las partes de las nubes que se superponen, mediante el algoritmo *Iterative Closest Point*; el segundo realiza el cálculo de la transformación necesaria mediante puntos de apoyo de coordenadas conocidas (Lague *et al.*, 2013). En este caso, la correspondencia entre nubes a partir de zonas comunes no se consideró adecuada, pues precisamente las nubes de puntos representan una zona que experimenta cambios a lo largo del tiempo, y las zonas sin cambio se limitaban al borde de la bandeja, demasiado estrecho y poco definido en algunas partes de la nube. Esta técnica está diseñada para el registro de nubes consecutivas que se solapan parcialmente, caso habitual cuando la zona de interés es demasiado grande para ser representada en un solo escaneo y se realizan varios; en este caso, la zona era lo suficientemente pequeña para ser escaneada desde una sola posición.

Se optó pues por el segundo método para la referenciación de las nubes, la transformación con puntos de apoyo. Se determinó la transformación de semejanza espacial entre las nubes láser y las nubes de PhotoScan, que ya estaban referenciadas, a partir de un conjunto de puntos medidos en ambas nubes empleando el programa CloudCompare. Se aplicó en todos los casos una transformación de semejanza espacial, compuesta por una homotecia, tres traslaciones y tres giros respecto a los ejes X, Y, Z. El resultado de la transformación se muestra en la ventana de resultados del programa (Figura 3.21); el EMC total obtenido es de 0.95 mm. La matriz de la transformación obtenida en coordenadas homogéneas se muestra en la Figura 4.2.

$$\begin{pmatrix} +1.000235 & 0.011798 & -0.002114 & 98.326248 \\ -0.011798 & 1.000237 & 0.000297 & 97.429893 \\ 0.002117 & -0.000272 & 1.000305 & 100.123886 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 4.2: Matriz de transformación del sistema de referencia del láser escáner al sistema local

Para este tipo de estudios es fundamental que las nubes de puntos que se van a comparar estén referidas al mismo sistema de referencia. Para poder obtener resultados más precisos se podrían diseñar y disponer puntos de referencia codificados, que se puedan medir automáticamente, fijos en zonas del simulador y la bandeja en donde no perturben el desarrollo del episodio de lluvia y erosión.

Otra posibilidad para obtener nubes de puntos referidas al mismo sistema en las tomas de imágenes de episodios sucesivos es fijar la posición de las cámaras. Precisamente una de las ventajas del método SfM es que no se necesita estacionar la cámara en posiciones predeterminadas; sin embargo, si las imágenes se toman cada vez desde las mismas posiciones fijas, las nubes obtenidas estarán todas ellas en la misma posición relativa, de forma análoga a lo realizado para las nubes láser. Esto se podría realizar siempre que el experimento esté diseñado de forma que garantice que los elementos permanezcan fijos, sin desplazamientos entre tomas; combinado con los puntos señalizados, ofrecería un marco de referencia rígido y preciso para la obtención de nubes de puntos y modelos 3D referenciados.

4.3 Distancia entre las nubes de puntos laser y foto

Se calcularon las distancias entre las nubes de puntos láser y foto correspondientes a cada momento temporal, aplicando el algoritmo M3C2 (Lague *et al.*, 2013). Los resultados se muestran en la Tabla 4.2 y en el anexo E.

Tabla 4.2: Estadísticos básicos de las distancias entre las nubes de puntos láser y foto (valores en mm)

Nubes comparadas	Mínimo	Máximo	Media	SD
Láser-foto 0	-2.857	2.086	-0.008	0.503
Láser-foto 1	-1.600	1.683	0.017	0.450
Láser-foto 2	-2.563	2.490	0.024	0.637
Láser-foto 3	-1.317	1.327	-0.133	0.340
Láser-foto 4	-0.731	1.021	-0.002	0.208
Láser-foto 5	-0.716	1.086	-0.009	0.207

La comparación con el láser se realizó para tener una valoración de la exactitud de las nubes de puntos obtenidas con fotogrametría, asumiendo en este trabajo las mediciones del láser como superficie de referencia. El escáner láser empleado, Leica ScanStation2, se ha utilizado en otros estudios similares (Heng *et al.*, 2010; Lerma *et al.*, 2013; Lague *et al.*, 2013) para obtener una superficie de referencia con la que comparar los resultados de los MDE obtenidos a partir de imágenes, y para detección de cambios en la topografía del terreno; Lague *et al.* (2013) refieren valores de exactitud del orden de 0.2 mm y precisión (o ruido) de 1.41 mm a 50 m. La experiencia de trabajos anteriores realizados con el mismo instrumento usado en el trabajo actual demuestra que a una distancia de 3 m el ruido del escáner y la exactitud en la determinación de la profundidad están en torno a 1 mm (Balaguer Puig, 2011). Se considera inicialmente que las nubes de puntos obtenidas con el escáner son adecuadas como referencia. Se trata de un escaneado realizado desde una única posición y a una distancia muy pequeña de un objeto que se comporta de manera homogénea, y puede tomarse como una referencia que ayude a identificar posibles errores sistemáticos en el proceso fotogramétrico. No obstante, se podría realizar una comprobación adicional de la exactitud de la nube de puntos obtenida por el láser mediante un experimento específico que analizara los resultados del escáner sobre superficies cuya rugosidad es igual o inferior al tamaño del punto láser.

Las distancias medias entre las nubes láser y foto varían entre 0.002 mm en el momento 4 y 0.133 mm en el momento 3, con un valor promedio de 0.032 mm. El promedio de las desviaciones típicas es de 0.391 mm. Estos valores corresponden al cálculo de las distancias entre puntos de las nubes comparadas; el signo de las distancias obtenidas indica si los puntos de la nube comparada están por encima o por debajo de la nube de referencia. Se estableció como nube de referencia la nube láser y como nube de comparación la nube foto. La distancia entre los dos conjuntos de nubes es aceptable.

En el anexo E se muestran las imágenes ráster correspondientes a las diferencias entre las nubes de puntos, además de los correspondientes modelos con sombreado para destacar el relieve. En la Tabla 4.2 se aprecia que las mayores diferencias se producen en los momentos iniciales 1, 2 y 3; esto puede deberse a la distinta densidad de puntos que presentan y a la pequeña magnitud de la rugosidad de la superficie.

En los tres últimos se aprecia un patrón en la imagen de las diferencias que parece corresponder al ruido del escáner.

Otro factor que puede influir en la distancia obtenida es el error introducido por el registro geométrico de las nubes de puntos. El procedimiento de identificación de puntos comunes en las nubes de puntos no resulta sencillo, sobre todo si la densidad de puntos no coincide en ambas nubes, como es este caso. James y Robson (2012) proponen una herramienta de programación propia que permite identificar los puntos en las imágenes y emplear las orientaciones y modelos de cámara para determinar las correspondientes coordenadas del punto en el sistema de referencia de la nube; en los programas empleados en este trabajo, no existía ninguna opción similar, que probablemente hubiese proporcionado mayor calidad a la transformación geométrica, eliminando parte del error en la determinación de los puntos a emparejar.

En el presente trabajo, la diferencia entre nubes láser y nubes foto no influye en los posteriores estudios sobre volumen de erosión, puesto que las diferencias de MDE se realizan entre los MDE del mismo tipo.

4.4 Precisión de los MDE

Los MDE se han generado para determinar la magnitud de los procesos de erosión y deposición a partir de las diferencias entre ellos. El factor más importante para determinar la fiabilidad de las diferencias de MDE es la precisión individual de cada uno de ellos y su registro geométrico. Para obtener estimaciones fiables de la erosión y deposición producidas se ha de trabajar con MDE con niveles de precisión proporcionales a la magnitud de los errores aceptables (Williams, 2012).

A partir de las nubes de puntos se generaron MDE ráster mediante procedimientos de interpolación. Se utilizaron las herramientas de análisis geoestadístico de ArcMap para el análisis previo de los métodos de interpolación IDW y RBF mediante validación cruzada (Tabla 4.3). Los resultados muestran un error muy semejante en ambos métodos, justificando así la elección del método de interpolación IDW para la generación de los MDE. Hay que notar que debido a la elevada densidad de las nubes de puntos empleadas los métodos de interpolación analizados producían resultados muy parecidos entre sí, y la selección

de uno u otro método se ha basado principalmente en las justificaciones teóricas anteriormente expuestas.

Tabla 4.3: Resultados de la estimación del error de interpolación de los métodos IDW y RBF mediante validación cruzada (valores en mm)

Nube de puntos	IDW		Splines RBF	
	Media	EMC	Media	EMC
Foto0	2.31E-04	0.124	9.59E-05	0.094
Foto1	9.43E-06	0.112	7.03E-05	0.108
Foto2	8.06E-05	0.112	6.15E-05	0.114
Foto3	-1.88E-05	0.148	5.72E-05	0.391
Foto4	-1.29E-05	0.131	2.85E-04	0.122
Foto5	7.05E-04	0.153	3.97E-04	0.349
Promedio:	1.66E-04	0.130	1.61E-04	0.196

Una vez obtenidos los MDE, la determinación del error de interpolación en Z se realizó mediante la técnica de validación con muestras divididas, *split-sample*. Se calcularon los estadísticos básicos de la muestra (valores máximo y mínimo, media y desviación típica). Este método proporciona una referencia sobre la estabilidad y la precisión del algoritmo de interpolación (Erdogan, 2009). Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Resultados de la determinación del error de interpolación de los MDE obtenidos a partir de las nubes de puntos foto con el método IDW, con resolución de 1 mm (valores en mm)

MDE	Nº puntos Muestra	Nº puntos Test	Media	SD	EMC
Foto0	589129	31007	-0.048	0.098	0.109
Foto1	709619	37348	-0.049	0.091	0.103
Foto2	709977	37367	-0.047	0.090	0.101
Foto3	740533	38975	-0.047	0.104	0.114
Foto4	704019	37054	-0.046	0.088	0.100
Foto5	712591	37505	-0.045	0.096	0.107
Promedio:	694311	36543	-0.047	0.095	0.106

Los valores obtenidos muestran que el algoritmo de interpolación aplicado a estos datos es estable (EMC 0.106 mm) y preciso (media -0.047 mm).

Se ha considerado una distribución uniforme del error en toda la zona de estudio. En trabajos realizados a escalas correspondientes a zonas de mayor extensión como cuencas de erosión se ha planteado la existencia de una variación espacial de los errores (Carlisle, 2005; Fisher y Tate, 2006; Wheaton *et al.*, 2010; Milan *et al.*, 2011). Las áreas inclinadas con baja densidad de puntos y alta rugosidad superficial son las que presentan mayor variabilidad, mientras que en zonas planas con alta densidad de puntos y superficie poco rugosa, como es el caso de la bandeja de suelo, se puede considerar que el error en la elevación es espacialmente uniforme (Wheaton *et al.*, 2010).

No hay un único criterio para determinar la precisión de un MDE. Se pueden encontrar diversas propuestas adaptadas generalmente a cada trabajo particular. Así, Rieke-Zapp y Nearing (2005) determinan el error del MDE producido a partir de imágenes estereoscópicas comparando los valores de Z de puntos objeto calculados a partir de estereopares adyacentes. Gessesse *et al.* (2010) establecen el error a partir de la desviación estándar de las diferencias de elevación entre un conjunto de puntos medidos manualmente y el MDE. Gómez-Gutiérrez *et al.* (2014a) consideran que el error de un MDE será el error obtenido durante la etapa de georreferenciación. Otros autores destacan que para estudios basados en DoD es más importante el error relativo de los MDE debidos a la interpolación (Reuter *et al.*, 2009), que no es considerado en los trabajos antes citados. En el presente trabajo no era posible establecer puntos de control sobre la superficie del modelo, puesto que la propia superficie iba modificándose durante el experimento. Los puntos ubicados sobre ella no serían fijos, y además podrían perturbar el flujo de sedimentos. El error en la transformación geométrica para cada nube de puntos es el EMC obtenido en los puntos de apoyo; en las nubes de PhotoScan presenta un valor medio de 0.6 mm.

Así pues, el error total de un MDE considerado en esta tesis es la composición del error en la transformación geométrica y el error de interpolación (Ecuación 3.9).

$$E_{MDE} = \sqrt{E_T^2 + E_I^2} = \sqrt{0.654^2 + 0.106^2} \approx 0.7 \text{ mm}$$

Dada la homogeneidad de los valores que presentan los MDE se ha considerado un valor medio de error para todos ellos de 0.7 mm.

Se ha de indicar que los programas empleados no ofrecen al usuario los resultados completos del ajuste mínimo-cuadrático de haces de rayos aplicado, como es habitual en los programas fotogramétricos. CloudCompare ofrece solamente un indicador del valor del EMC total alcanzado; PhotoScan proporciona una tabla con los errores en X, Y, Z y total en cada punto de apoyo. En general los programas SfM se centran en la obtención de modelos tridimensionales fotorrealísticos de forma rápida y sin restricciones en cuanto al número y tipo de imágenes empleadas, sin ceñirse a los estrictos estándares de precisión métrica de las aplicaciones fotogramétricas. Algunos factores pueden disminuir la precisión de las reconstrucciones obtenidas en SfM (James y Robson, 2012): el algoritmo de detección de elementos empleado en la etapa de orientación de las imágenes puede producir precisiones relativamente bajas en la determinación de las posiciones de los puntos, degradando la calidad de las orientaciones de las imágenes y del modelo de cámara obtenidos.

Otro aspecto que puede influir en los resultados obtenidos es el modelo de calibración de cámara empleado. Es habitual trabajar con cámaras comerciales no diseñadas con fines métricos que emplean objetivos de focal variable, generalmente gran angulares que facilitan la adquisición de imágenes redundantes del objeto, pero que suelen presentar elevadas distorsiones en los bordes de las imágenes. Algunos elementos habituales hoy en día en las cámaras de gama media y baja, como estabilizador de imagen, sistema de limpieza automática del sensor o autoenfoco, requieren flexibilidad en la posición del sensor, y por tanto reducen la estabilidad geométrica del sistema de la cámara desde un punto de vista fotogramétrico. La solución habitual para poder emplear estas cámaras en el trabajo fotogramétrico riguroso es la caracterización paramétrica. La parametrización puede evidenciar los síntomas de una geometría inestable de la cámara, pero no puede representar la causa real de la inestabilidad (Rieke-Zapp *et al.*, 2009). Otro factor a tener en cuenta es la estabilidad temporal de estos parámetros (Řezníček, 2014). El programa PhotoScan puede realizar una autocalibración durante el ajuste para obtener los parámetros de la cámara o calcular una optimización de unos parámetros previos conocidos. Nouwakpo *et al.* (2014) comparan los resultados de la autocalibración y optimización de parámetros de la cámara realizada por programas SfM como PhotoScan con los procedimientos independientes de calibración basados en patrones,

concluyendo que los parámetros de la cámara que más influyen son las coordenadas del punto principal. En este trabajo se especificó inicialmente un modelo de cámara obtenido mediante la calibración previa de la cámara empleada (Anexo C). Se realizó en PhotoScan la orientación de las imágenes de dos formas: la primera dejando fijos los parámetros de la cámara, y la otra permitiendo su optimización durante el ajuste, obteniendo nuevos valores ajustados. Los resultados fueron mejores optimizando la cámara en dos de los modelos (se pasó de un EMC de 2 mm a 0.6 mm), y aproximadamente iguales en el resto. Se optó por permitir la optimización y obtener unos nuevos parámetros de cámara ajustados. Se tuvo en cuenta también la elevada distorsión del objetivo empleado y la posible inestabilidad de los parámetros de la cámara en las condiciones ambientales durante la toma de las imágenes. Los resultados muestran un objetivo con una distorsión considerable en los bordes de la imagen.

4.5 Cálculo de volumen de cambio a partir de diferencias entre MDE

Los MDE obtenidos representan la superficie topográfica del suelo en determinados momentos correspondientes a sucesivos episodios de lluvia. La diferencia de elevaciones entre dos superficies sucesivas, asumiendo que están en el mismo sistema de referencia, permite obtener el volumen de cambio ocurrido entre esos dos momentos.

Se dispone de seis MDE, numerados de 0 a 5, correspondientes al momento inicial y a los momentos posteriores a los cinco episodios de lluvia artificial. Se han comparado los MDE siguiendo la secuencia temporal; así, se ha obtenido una serie de cinco DoD correspondientes a los episodios sucesivos, denominados en adelante DoD0-1, DoD1-2, DoD2-3, DoD3-4, DoD4-5, más uno correspondiente a todo el período, DoD0-5.

Se realizaron las diferencias de MDE con la herramienta DEM Difference, obteniendo para cada DoD un fichero ráster con la diferencia de elevaciones, otro con la clasificación en erosión, deposición o sin cambio sin aplicar ningún umbral, y un fichero de texto con los resultados numéricos: valores mínimo y máximo de diferencias

de elevaciones, número de celdas, área y volumen de cada categoría. La Tabla 4.5 muestra los valores numéricos obtenidos en los DoD. Los ficheros ráster se muestran en el Anexo E.

Tabla 4.5: Resultados DoD: clasificación en categorías (erosión, deposición y sin cambio) y volumen neto

DoD	Erosión			Deposición			Sin cambio			Volumen neto cm3
	Nº celdas	% total	Vol. cm3	Nº celdas	% total	Vol. cm3	Nº celdas	% total		
DoD0-1	387489	82.4%	237.8	80748	17.2%	25.6	2175	0.5%	212.2	
DoD1-2	290295	61.7%	124.6	177400	37.7%	83.2	2717	0.6%	41.4	
DoD2-3	380843	81.0%	331.3	88919	18.9%	50.9	650	0.1%	280.4	
DoD3-4	243101	51.7%	149.7	224305	47.7%	101.7	3006	0.6%	48.0	
DoD4-5	364037	77.4%	172.2	103210	21.9%	30.6	3165	0.7%	141.6	
			1015.6			292.0			723.6	
DoD0-5	379764	80.7%	889.2	90524	19.2%	165.6	124	0.03%	723.6	

Se observa en la Tabla 4.5 que el volumen total de erosión y deposición obtenido sumando los valores correspondientes a los DoD sucesivos es mayor que el obtenido en DoD0-5. La estimación de valores de erosión/deposición a partir de diferencias entre superficies topográficas observadas en diferentes momentos puede estar negativamente sesgada debido a la compensación de volúmenes de erosión y deposición entre observaciones. La compensación se produce cuando hay un cambio en un punto entre erosión y deposición entre dos observaciones. La estimación del volumen de cambio es siempre menor que la que se obtendría si fuera posible monitorizar de forma continua el cambio topográfico; el sesgo producido es mayor cuando los volúmenes de erosión y deposición son muy similares (Lindsay y Ashmore, 2002).

Se estudió esta relación entre frecuencia temporal y volumen obtenido en las diferencias de MDE a partir del conjunto de MDE. Los DoD obtenidos inicialmente corresponden a la máxima frecuencia temporal para este experimento. Para analizar la variación del volumen calculado al variar la frecuencia se realizaron nuevas diferencias entre MDE con diferentes intervalos temporales, de mayor duración, de manera que se dispone de cinco series:

- DoD0-5
- DoD0-3, DoD3-5
- DoD0-2, DoD2-3, DoD3-5

- DoD0-2, DoD2-3, DoD3-4, DoD4-5
- DoD0-1, DoD1-2, DoD2-3, DoD3-4, DoD4-5

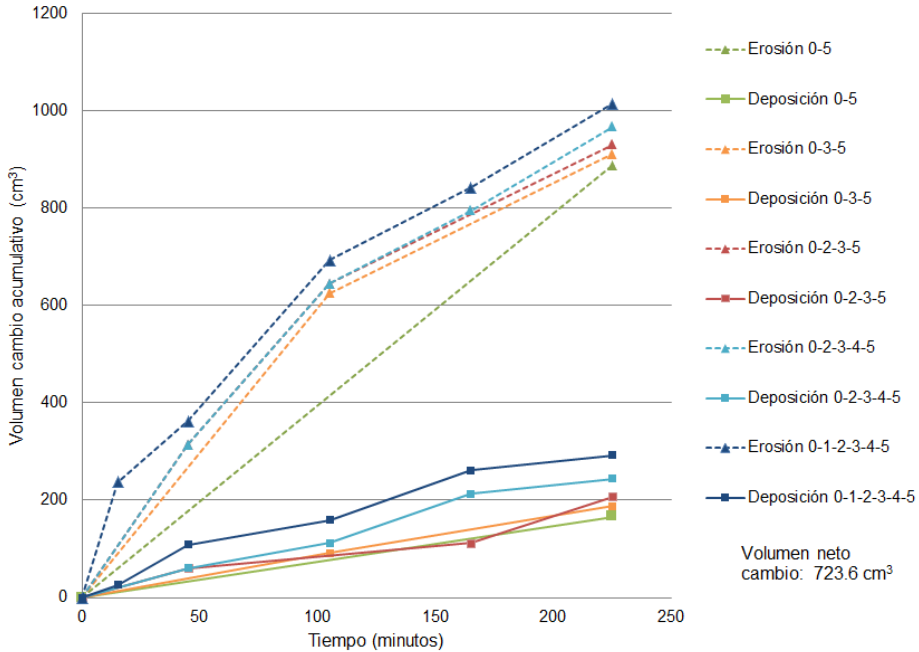


Figura 4.3: Volumen acumulado de erosión y deposición para distintas frecuencias temporales

Se ha representado en la Figura 4.3 el volumen acumulado de erosión y deposición correspondiente a cada una de estas secuencias temporales. Se aprecia claramente que el volumen estimado disminuye cuando se reduce el número de superficies de comparación a lo largo del período de tiempo considerado. A pesar de esta relación negativa entre frecuencia temporal de observación y volumen acumulado, el volumen de cambio neto (erosión menos deposición) es independiente del intervalo de muestreo, y permanece constante para todos los intervalos, con un valor de 723.6 cm³.

Este comportamiento observado coincide con los resultados de Lindsay y Ashmore (2002) en un experimento de laboratorio sobre un cauce artificial de 3 x 11.5 m con sedimento de arena de grosor medio sobre el que se aplica una descarga de agua constante, y se analiza un período de 100 minutos (a partir del minuto 365 desde el inicio

del flujo de agua) a través de MDE obtenidos por fotogrametría. En este período se interrumpe el flujo cada 10 minutos y se deja que se desagüe el agua superficial, para a continuación tomar las imágenes, de forma similar al procedimiento seguido en esta tesis, obteniendo 10 MDE con una frecuencia temporal de 10 minutos. Estos autores modelizan la relación entre frecuencia temporal y volumen a través de una función de proporcionalidad inversa (hipérbola equilátera con asíntotas paralelas a los ejes coordenados), y realizan un estudio de los mecanismos de compensación de erosión-deposición observados en el cauce. En el caso de la presente tesis, no se llegaron a formar regueros debido probablemente a la baja intensidad de lluvia aplicada y su duración; la erosión y deposición producidas son difusas, y los cambios entre erosión y deposición entre observaciones sucesivas son frecuentes. El análisis en profundidad del comportamiento de la erosión hídrica y los mecanismos de erosión-deposición queda fuera de los objetivos de esta tesis; sin embargo, esta es una interesante posibilidad que ofrece el análisis de secuencias temporales de MDE que se puede desarrollar en futuras investigaciones.

Estas diferencias entre MDE se han realizado sin aplicar ningún umbral. Sin embargo, tal como se comenta en el apartado 3.8, es necesario considerar la incertidumbre asociada a la diferencia de MDE. Se obtuvieron pues los DoD estableciendo un umbral mínimo para considerar que la diferencia de elevación es significativa. El umbral se calculó aplicando las ecuaciones 3.9 y 3.11 a partir de los valores de error de los MDE obtenidos anteriormente:

$$E_{MDE_{Foto}} = 0.7 \text{ mm}$$

$$LOD_{Foto} = E_{DoD_{Foto}} = \sqrt{2} \cdot E_{MDE_{Foto}} = \sqrt{2} \cdot 0.7 \approx 1 \text{ mm}$$

Se realizó el mismo análisis de variación del volumen calculado en función de la frecuencia temporal de muestreo, que se representa en la Figura 4.4. Se puede observar que se invierte la tendencia: el volumen calculado aumenta cuando disminuye la frecuencia temporal, es decir, con observaciones más espaciadas. Además el volumen neto ya no se mantiene constante, sino que varía de la misma forma. Comportamientos similares se describen en Schneider *et al.* (2011) (aunque a una escala de trabajo diferente). Brasington y Smart (2003) indican que a causa de la naturaleza episódica de la erosión y deposición la obtención de tasas de cambio de volumen dependen

en gran medida del tiempo de integración utilizado en su cálculo, y resaltan la complejidad de la intercomparación de los flujos de sedimentos a corto plazo.

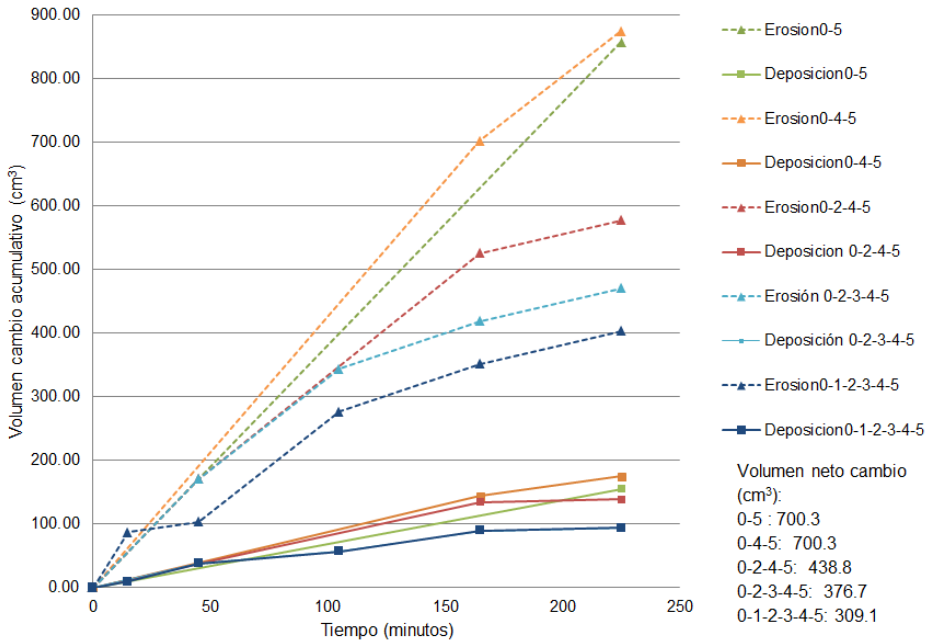


Figura 4.4: Volumen acumulado de erosión y deposición para distintas frecuencias temporales con DoD umbralizados

Así, para los cálculos de volumen y sedimentos se optó por considerar la secuencia temporal original, coherente con los valores de sedimento de escorrentía recogidos, de forma que se trabajó con los DoD correspondiente a los episodios sucesivos: DoD0-1, DoD1-2, DoD2-3, DoD3-4, DoD4-5. La Tabla 4.6 muestra los valores de los DoD aplicando un umbral de 1 mm.

Las diferencias de elevaciones de los DoD están en su mayoría en un rango de ± 3 mm, por lo que el valor de umbral aplicado es fundamental para obtener buenos resultados. Es evidente que en este orden de magnitud la aplicación de un umbral de 1 mm producirá resultados muy diferentes respecto de la diferencia simple entre los MDE sin considerar ningún umbral. En la Tabla 4.5 se puede ver, por ejemplo, que en DoD0-1 sin umbralizar un 82.4% de los pixels se clasifican

Tabla 4.6: Resultados DoD con umbral 1 mm: clasificación en categorías (erosión, deposición y sin cambio) y volumen neto

DoD	Erosión			Deposición			Sin cambio		Volumen neto	
	Nº celdas	% total	Vol cm ³	Nº celdas	% total	Vol cm ³	Nº celdas	% total	Vol cm ³	Acum. cm ³
DoD0-1	67561	14.36	86.5	6141	1.31	8.9	396710	84.33	77.6	77.6
DoD1-2	22059	4.69	29.0	14579	3.10	16.8	433774	92.21	12.2	89.8
DoD2-3	128616	27.34	173.7	14180	3.01	19.2	327616	69.64	154.5	244.3
DoD3-4	54178	11.52	74.5	26946	5.73	32.2	389288	82.75	42.3	286.6
DoD4-5	39809	8.46	51.7	4163	0.88	4.8	426440	90.65	46.9	333.5

como erosión, frente al 14.4% obtenido cuando se aplica un umbral de cambio significativo de 1 mm que se observa en la Tabla 4.6.

La Figura 4.5 muestra los valores de volumen neto de cambio, calculado como la diferencia entre volumen de erosión y volumen de deposición. Se observa que la discriminación entre cambios no significativos (correspondientes a variaciones de elevación inferiores a 1 mm en valor absoluto) y cambios significativos es menor en los DoD que obtienen menor volumen de cambio, en los que se da una mayor frecuencia de diferencias de elevaciones de pequeña magnitud.

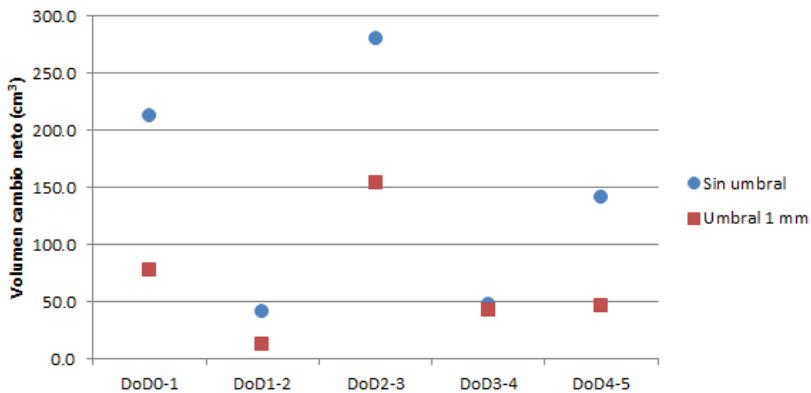


Figura 4.5: Comparación de volumen neto calculado de los DoD sin umbralizar y con umbral 1 mm

Para analizar la evolución de los cambios de volumen a lo largo de los sucesivos episodios de lluvia se ha representado el volumen neto acumulado de los DoD (Figura 4.6), en la que se aprecia claramente la tendencia de cambio creciente seguida en función de la duración de la

lluvia, y se evidencia la diferencia entre las estimaciones a partir de los DoD con y sin umbral.

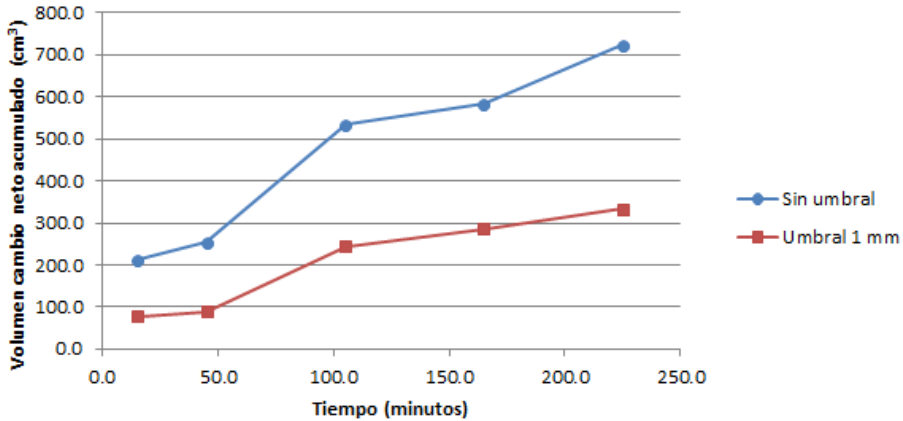


Figura 4.6: Volumen neto acumulado calculado de los DoD

Estos resultados indican que la elección del umbral mínimo es clave en la obtención de resultados fiables. Trabajos como los de Lane *et al.* (2003) o Wheaton *et al.* (2010) muestran la gran variación de los resultados obtenidos modificando este umbral, aunque en ambos casos se trata de escalas diferentes (zonas de unos 3 km a lo largo de un río en Nueva Zelanda y Escocia, respectivamente).

Los MDE obtenidos también pueden proporcionar información sobre los patrones de erosión y deposición durante el proceso erosivo, analizando la formación de regueros y las zonas de acumulación. El estudio del relieve obtenido para experimentos con distintas pendientes de suelo puede ayudar en la modelización de la erosión.

4.6 Cálculo de pérdida de suelo

En el experimento se recogió el sedimento arrastrado por el flujo de agua y se obtuvo su peso. Se puede determinar la similitud entre estos resultados y los obtenidos a partir de los DoD. El volumen de cambio neto obtenido en los DoD puede convertirse en suelo perdido a partir de la densidad aparente calculada para el suelo contenido en

la bandeja del experimento. En la Tabla 4.7 se muestran los resultados del sedimento perdido calculado a partir del volumen de cambio neto obtenido, para los DoD sin umbral y con umbral 1 mm, y se comparan con el peso de sedimento arrastrado por la escorrentía. El flujo de agua de infiltración se recogió sin distinción entre los sucesivos episodios de lluvia, de manera global, y se muestra por separado. En la Figura 4.7 se representa el sedimento calculado y recogido en los sucesivos episodios de lluvia.

Tabla 4.7: Resultados DoD: sedimento calculado y sedimento recogido en la escorrentía y la infiltración

DoD	Sin umbral		LOD= 1mm		Sedimento recogido	
	Sedimento calculado		Sedimento calculado		Escorrentía	Acum.
	Vol · ρ_b	Acum.	Vol · ρ_b	Acum.	g	g
DoD0-1	303.4	303.4	111.0	111.0	16.6	16.6
DoD1-2	59.2	362.6	17.4	128.4	11.7	28.3
DoD2-3	401.0	763.6	220.9	349.4	84.3	112.6
DoD3-4	68.6	832.3	60.5	409.9	147.4	260.0
DoD4-5	202.5	1034.7	67.0	476.9	128.4	388.4
					Infiltración:	26.0
						414.4

Densidad aparente $\rho_b=1.43 \text{ g/cm}^3$

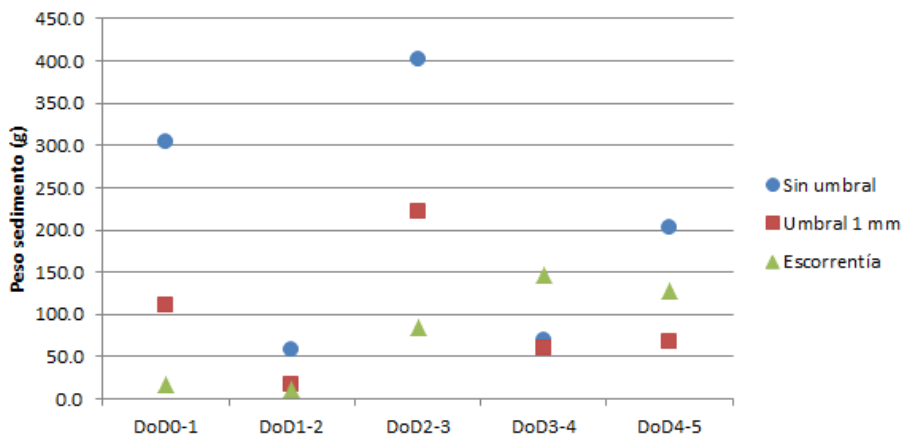


Figura 4.7: Sedimento calculado a partir de los DoD y recogido en la escorrentía

En el análisis de los resultados se ha de tener en cuenta que no se han considerado en el planteamiento del trabajo algunos factores como el

comportamiento específico del tipo de suelo contenido en la bandeja según su composición, la influencia de la infiltración o el asentamiento del suelo; estos factores pueden influir en los resultados obtenidos. Es necesario también tener en cuenta que la conversión del volumen de cambio obtenido a peso de sedimento perdido se realiza a partir del valor de la densidad aparente del suelo calculada. La consideración de un valor distinto de densidad aparente de suelo se traduce en los resultados en un cambio proporcional del peso obtenido. Además es un parámetro que puede variar localmente, y que experimenta modificaciones a lo largo de los episodios de lluvia. En el trabajo se ha considerado que la densidad aparente es homogénea en toda la bandeja y continua para todo el experimento de lluvia. Sin embargo en este caso es posible que se haya producido una variación de las características del suelo de la bandeja a lo largo de los sucesivos episodios de lluvia, pues el suelo inicial no presentaba excesiva compactación, aunque se humedeció previamente a la realización del experimento con regularidad para que alcanzara una densidad estable. La determinación del valor de la densidad aparente es pues fundamental para la correcta interpretación de los resultados obtenidos y su conversión a peso de suelo perdido.

En la Figura 4.8 se representa el sedimento calculado y recogido en los sucesivos episodios de lluvia.

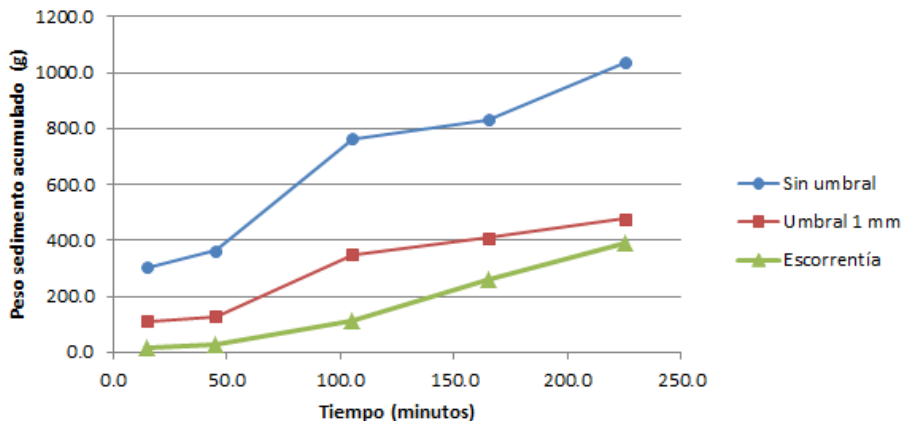


Figura 4.8: Sedimento acumulado calculado a partir de los DoD y recogido en la escorrentía

Se observa una correlación bastante clara entre el sedimento recogido y el determinado a partir de la diferencia de MDE umbralizada (Figura 4.8); los valores calculados son más elevados que los recogidos, con una sobreestimación de un 18%. Hay que indicar aquí que este valor de sedimento total recogido no incluye el sedimento recogido en la infiltración; si se considera esta cantidad la diferencia es del 13%.

Los datos de la Tabla 4.7 para los DoD umbralizados muestran en DoD2-3 un valor de sedimento calculado mucho más alto (220.9 g) que el anterior y posterior (17.4 y 60.5 g) que no sigue la tendencia del sedimento arrastrado. Esto se aprecia también en las Figuras 4.5 y 4.7; la comparación con la gráfica del sedimento recogido (Figura 4.7) indica que se produce en este episodio una estimación de volumen y por tanto de sedimento calculado mayor que el sedimento realmente recogido. En cambio los valores calculados para los restantes episodios parecen seguir la misma tendencia que el sedimento recogido en la escorrentía. Una posible interpretación es que se haya producido un asentamiento del suelo de la bandeja durante el tercer episodio de lluvia, entre los minutos 45 y 105, tal y como se aprecia en la Figura 4.7 (que coincide con el inicio y estabilización del agua de infiltración recogida). Este asentamiento o compactación del suelo implica que disminuye la cantidad de sedimento arrastrado fuera de la bandeja, y la diferencia de volumen observada se corresponde a una cantidad de sedimento menor. La influencia de un posible asentamiento en los resultados obtenidos puede ser relevante: por ejemplo, una altura media de 0.1 mm en la bandeja, de 4615 cm², representa un volumen de 46.15 cm³, que teniendo en cuenta la densidad aparente del suelo equivale a 66 g de suelo. Rieke-Zapp y Nearing (2005) realizan un experimento de simulación de lluvia sobre una bandeja de suelo y refieren resultados similares, con volúmenes calculados mayores que el sedimento recogido, que atribuyen al asentamiento del terreno. Heng *et al.* (2010) y Armstrong *et al.* (2011) realizan sendos estudios experimentales con simulación de lluvia de distintas intensidades sobre parcelas con distintas pendientes, y relacionan los cambios en la morfología de la superficie del suelo con cambios de la densidad aparente del suelo debidos a la compactación a causa de la lluvia.

Por otra parte, la composición del suelo influye en el grado de asentamiento experimentado por un suelo. Moritani *et al.* (2011) concluye que la densidad aparente del suelo influye en la precisión con la que el MDE estima la erosión experimentada; en suelos de mayor

densidad aparente, los resultados de la estimación y los del sedimento recogido son más similares que en suelos de baja densidad.

Con el fin de tener información sobre este aspecto, se realizó posteriormente al experimento de lluvia una nueva determinación de la densidad aparente del suelo de la bandeja. Se tomaron dos nuevas muestras de suelo en la bandeja, una en la parte superior y otra en la parte inferior, y se llevó a cabo el mismo procedimiento indicado en el apartado 3.4.2. El resultado (Tabla A.4) muestra un ligero incremento de la densidad aparente, compatible con el asentamiento del suelo de la bandeja. En la determinación de la densidad aparente del suelo se aprecian ligeras diferencias en las dos zonas en las que se tomaron las muestras; se ha considerado que la densidad aparente es constante y homogénea en toda la parcela, dadas sus reducidas dimensiones, pero si no lo es se introduce un error que repercute en el valor de suelo calculado. En el caso de la bandeja de suelo, es complicado tomar más muestras sin alterar la preparación. Por último, el error de la determinación del valor de densidad aparente puede producir variaciones en el valor calculado de pequeña magnitud, hasta un 1.5%.

Se ha aplicado una regresión lineal para determinar la relación entre duración de la lluvia y cantidad de sedimento producido en el experimento, obteniendo la ecuación de la recta de regresión y el coeficiente de correlación lineal de Pearson: $y = 1.8354x - 42.546$, $R^2 = 0.97$. Esta recta de regresión representa el comportamiento de la producción de sedimentos de esta parcela de suelo en función la duración de la lluvia, para unas condiciones concretas, asumiendo todas las simplificaciones antes citadas (intensidad de lluvia y textura del suelo constantes). Se ha obtenido la recta de regresión correspondiente a los DoD y los DoD umbralizados. Se puede observar (Figura 4.9) que la línea de regresión obtenida para los DoD con umbral tiene prácticamente la misma pendiente que la del sedimento recogido, con mayor ordenada en el origen para la recta correspondiente al modelo de DoD; esto parece indicar que el método de DoD con umbral 1 mm producirá valores proporcionalmente mayores que los reales. El coeficiente de regresión es obtenido es alto, 0.93, significativo a un nivel de confianza del 95 % ($n=3$ grados de libertad) (Burke, 2001).

Si se considera que el método de diferencia de MDE es un instrumento de medida del sedimento producido en los experimentos de simulación de lluvia, se puede analizar la relación entre una serie de datos

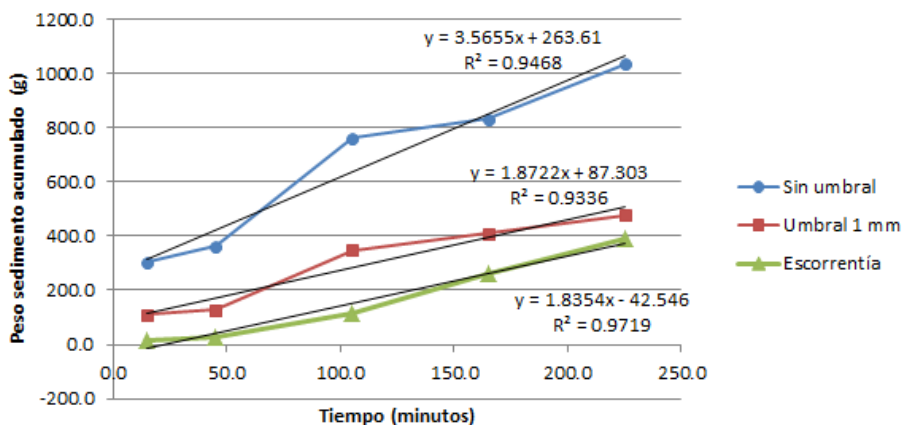


Figura 4.9: Análisis de regresión lineal entre duración de lluvia y sedimento estimado

de referencia (sedimento recogido) y los valores correspondientes determinados por el instrumento de medida (estimación de sedimento a partir de DoD). Se ha aplicado de nuevo un análisis de regresión lineal para estudiar la relación entre sedimento real y sedimento estimado con el método de DoD. El resultado muestra una correlación aceptable, $R^2=0.86$, con un nivel de significación del 95% (Figura 4.10).

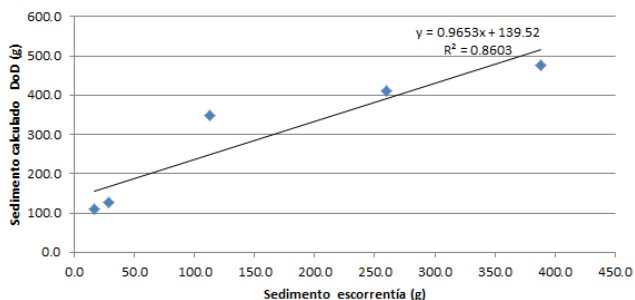


Figura 4.10: Análisis de regresión lineal entre sedimento recogido y sedimento determinado mediante DoDs foto umbralizado

4.7 Análisis de los programas empleados

El trabajo se ha centrado en la utilización de programas basados en la metodología SfM. En general, este tipo de programas parece especialmente adecuado para su utilización en múltiples ámbitos, distintos de los de la Geomática y la Fotogrametría: prácticamente no se necesita más que las imágenes del objeto o zona que se quiere modelizar, y el programa se encarga de realizar de forma automática todas las tareas: obtención de puntos homólogos, orientación de las imágenes, obtención de los parámetros de la cámara, obtención de una nube de puntos de la superficie del objeto y creación de un modelo 3D. Sin embargo, toda esta sencillez de manejo conlleva muchas veces una pérdida de control sobre el proceso y poca información sobre los resultados obtenidos, sobre todo en las etapas intermedias. En función de las necesidades del usuario, los programas SfM pueden ser una excelente solución o, por el contrario, producir resultados insuficientes en cuanto a calidad o precisión. Se han empleado inicialmente dos programas de este tipo en la obtención de las nubes de puntos para la modelización de la superficie de la bandeja de suelo. Se realiza a continuación un análisis de la experiencia de uso.

El programa AutoDesk 123DCatch se puede considerar un ejemplo extremo de simplicidad y sencillez de cara al usuario. Se trata de una aplicación gratuita del tipo "caja negra" (Nguyen *et al.*, 2012) en la que el usuario introduce unos datos iniciales, en este caso las imágenes del objeto que se quiere modelizar, y se obtiene como resultado el producto final, el modelo 3D, sin interacción para especificar opciones o parámetros. Es además un programa que trabaja "en la nube": el tratamiento de las imágenes no se realiza en el ordenador del usuario, sino que las imágenes se suben a un servidor donde se procesan, y cuando finaliza el usuario se descarga el resultado. Las opciones posteriores permiten marcar puntos homólogos para orientar imágenes que no se han conseguido orientar de forma automática, definir un sistema de referencia sencillo (ejes y escala), y editar partes de la malla. El resultado es un modelo 3D con textura fotográfica. Sin embargo todas estas evidentes ventajas del programa son adecuadas para otro tipo de usos distintos al planteado en este trabajo. No se ofrece información sobre los resultados del ajuste y orientación de las imágenes, la precisión obtenida o el modelo de cámara aplicado. No se puede establecer a priori la resolución o densidad de la malla de puntos

para la creación del modelo. Además es difícil planificar el trabajo, pues el tiempo que tarda tanto la carga de imágenes en la aplicación como la obtención de los resultados es muy variable, y depende de factores externos: velocidad de la conexión, saturación de trabajo de los servidores de la empresa, . . . , incluso en ocasiones se ha interrumpido por un "error indeterminado". Un último aspecto a considerar es que la continuidad de la aplicación no está asegurada; el entorno, el interface y las prestaciones variaron en el período de tiempo en que se desarrolló este trabajo. Este programa se está utilizando en diversos ámbitos como la arqueología (Kersten y Lindstaedt, 2012; Chandler y Fryer, 2013; Lerma *et al.*, 2014), entre ellos la geomorfología (Micheletti *et al.*, 2015), y recientemente en estudios de erosión (Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2014a,b), obteniendo buenos resultados; en el caso del presente trabajo, a una escala mucho más detallada, en esta primera prueba los resultados no fueron satisfactorios, como se ha comentado ya. Se requiere un programa que proporcione más control sobre parámetros fotogramétricos básicos como el modelo de calibración de cámara o el ajuste del bloque de imágenes para obtener la precisión necesaria.

El segundo programa empleado es Agisoft PhotoScan. Se trata de uno de los programas SfM más difundidos y utilizados actualmente en muchos y muy diversos ámbitos: arqueología, patrimonio cultural, ecología, medicina forense, diseño y animación, cartografía y geomorfología, entre otros. Se empieza a aplicar en estudios de erosión a distintas escalas con buenos resultados (Castillo *et al.*, 2013; Kaiser *et al.*, 2014; Nouwakpo *et al.*, 2014; Nadal Romero *et al.*, 2014; Bauer *et al.*, 2015; Smith y Vericat, 2015; Prosdocimi *et al.*, 2015). Es un software propietario que funciona bajo licencia. A las características típicas de los programas SfM añade algunas funciones especializadas: autocalibración de cámaras, uso de puntos de apoyo para la definición del sistema de referencia, obtención de informes de los resultados geométricos del ajuste del bloque de imágenes, generación de texturas, posibilidad de exportar los resultados de diferentes maneras (nubes densas de puntos y nubes de puntos de paso, mallas vectoriales, MDE ráster, ortofotos), definición de máscaras sobre las imágenes iniciales para delimitar las zonas de interés, y otras que no se han aplicado en este trabajo. Es un programa robusto, de funcionamiento sencillo, bastante intuitivo y de rápido aprendizaje, que es capaz de procesar gran cantidad de imágenes de manera relativamente rápida; no obstante, requiere ordenadores de

altas prestaciones (GPU de alta gama, como Nvidia GeForce series 8xxx o ATI Radeon HD series 5xxx o superiores, memoria RAM mínima 12 GB, procesador Intel Core i7) para asegurar un funcionamiento fluido. Los resultados de PhotoScan en este trabajo han sido satisfactorios; la automatización de las tareas de orientación de las imágenes y obtención de nubes densas de puntos se ha combinado con los procesos manuales de medición de puntos de apoyo y definición de máscaras en las imágenes, consiguiendo modelos 3D de alta precisión orientados en el sistema de referencia local. Una interesante posibilidad que ofrece el programa, que no ha sido explorada en este trabajo, es la personalización del flujo de trabajo mediante comandos y scripts Python, que permitirían diseñar un procedimiento *ad hoc*: creación de plantillas de parámetros para el procesado de las nubes de puntos de los sucesivos episodios de lluvia, creación de informes de las etapas intermedias del trabajo para su revisión, generación de ficheros de resultados del formato deseado. En definitiva, este programa se considera muy adecuado para el tipo de trabajo planteado, pues aún la simplicidad de uso de una aplicación no especializada con las funcionalidades específicas para el control del procedimiento desde el punto de vista fotogramétrico.

El procesamiento de las nubes de puntos para generar MDE, la obtención de las diferencias entre ellos y la reclasificación de los resultados en términos de erosión y deposición se ha llevado a cabo empleando el programa ArcMap. Se trata del más potente SIG del mercado, y ofrece gran cantidad de herramientas de análisis espacial y geoestadístico, además de la posibilidad de programar herramientas propias. En este trabajo se emplearon las herramientas de Análisis Geoestadístico y Análisis Espacial, y además se decidió crear una herramienta propia, *DEM Difference*, para la tarea concreta de obtener la diferencia entre dos MDE ráster y clasificar el resultado como erosión, deposición o sin cambio en función de un intervalo de valores especificado por el usuario. ArcMap ofrece una herramienta similar, *Cut Fill*, que compara dos superficies y determina los cambios de volumen, identificando las zonas de acumulación, extracción y sin cambio; sin embargo no permite especificar un intervalo de valores correspondientes a las zonas sin cambio, asignando esta categoría únicamente a los pixels con un valor 0 en la diferencia de las dos superficies. Esto sería adecuado para general los DoDs sin umbralizar; para la obtención de los DoDs umbralizados es necesario realizar la

resta de los dos MDE y una reclasificación posterior. Con la herramienta propia se agiliza el proceso, pues la diferencia y la reclasificación se realizan en un solo paso, obteniendo además un fichero de texto con un informe correspondiente a las estadística y valores numéricos del DoD obtenido. Se valora muy positivamente el resultado.

Por último, citar que se ha empleado CloudCompare para operaciones básicas sobre las nubes de puntos, como conversión de formatos, transformaciones geométricas, filtrado de ruido, segmentación y eliminación de puntos, obtención de distancias entre nubes, y visualización con distintas simbologías de las nubes de puntos. Se trata de un software gratuito sencillo y potente que ha solucionado problemas puntuales y ha servido de puente entre programas que emplean formatos propietarios (e. g. Leica y ArcMap). Su uso se ha extendido rápidamente entre los usuarios de datos 3D gracias a todas estas ventajas.

4.8 Propuesta de metodología

El método SfM elimina la necesidad de establecer puntos de apoyo, y proporciona resultados en un sistema de referencia local arbitrario. Sin embargo en la determinación de la erosión por diferencias de MDE propuesta aquí es fundamental que los MDE estén referidos a un mismo sistema para realizar las diferencias entre ellos correctamente. El uso de puntos de apoyo en el trabajo proporciona el marco de referencia necesario. La metodología propuesta para los estudios de erosión en laboratorio combina la efectividad y sencillez de la fotogrametría SfM con la rigurosidad geométrica de la fotogrametría clásica.

Se describe a continuación la propuesta metodológica adaptada según los resultados obtenidos. Se empleará un simulador de lluvia que se considera estable y fijo durante todo el experimento, y el programa PhotoScan (u otro que tenga las mismas prestaciones).

1. Preparación del experimento de simulación de lluvia:
 - (a) Preparación de la bandeja con la muestra de suelo.
 - (b) Ubicación de la bandeja en el simulador de lluvia, con la pendiente adecuada.

- (c) Colocación de señales codificadas correspondientes a los puntos de apoyo en los bordes de la bandeja y en la estructura del simulador. Estas señales pueden ser detectadas y medidas automáticamente por el programa, proporcionando la mayor precisión posible en la medición de los puntos en las imágenes.
- (d) Medición de los puntos de apoyo señalizados mediante métodos topográficos. Se establecerá un sistema de referencia local y se calcularán las coordenadas de los puntos de apoyo.

2. Adquisición de datos:

- (a) Obtención de las imágenes de la superficie de la bandeja de suelo con la cámara fotográfica. Se tomarán las imágenes siguiendo una disposición en anillo alrededor de la bandeja de suelo, verificando que los puntos de apoyo aparecen en ellas.
- (b) Realización del episodio de simulación de lluvia de intensidad y duración establecidas.
- (c) Recogida de la escorrentía e infiltración durante la lluvia.
- (d) Obtención de imágenes de la superficie de la bandeja de suelo tras la lluvia, de la misma manera que en (a).

3. Obtención del sedimento arrastrado por la escorrentía mediante el filtrado del agua recogida.

4. Generación de los MDE correspondientes a cada episodio de lluvia.

- (a) Medición automática de los puntos de apoyo y orientación de las imágenes en PhotoScan, con optimización de los parámetros de la cámara.
- (b) Delimitación de la zona de interés sobre las imágenes mediante máscaras.
- (c) Obtención de la nube densa de puntos de la zona de interés.
- (d) Exportación de la nube de puntos obtenida a formato de intercambio de puntos XYZ.

- (e) Generación en ArcMap de los MDE ráster a partir de los ficheros de puntos, mediante interpolación con el método IDW.
 - (f) Determinación del error total de los MDE a partir de los errores obtenidos en la orientación y en la interpolación.
5. Cálculo de las diferencias entre MDE sucesivos mediante la herramienta propia *DEM Difference* en ArcMap, aplicando como umbral de detección de cambios el error del DoD (composición cuadrática de los errores de los MDE comparados).
 6. Análisis de los resultados y comparación con el sedimento recogido en la esorrentía.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

Yo no adivino. Como científico, sólo llego a conclusiones basándome en la observación y en la experiencia.

Sheldon L. Cooper

5.1 Conclusiones obtenidas

El objetivo de esta tesis es analizar los resultados ofrecidos por el procedimiento SfM basado en imágenes convergentes para modelizar los procesos de erosión y deposición en los experimentos de simulación de lluvia en laboratorio.

Se ha establecido un procedimiento para la obtención de los MDE de la zona experimental a partir de imágenes mediante SfM. El flujo de trabajo típico del método SfM, que utiliza únicamente las imágenes del objeto para obtener una nube de puntos 3D en un sistema relativo, se ha modificado introduciendo puntos de apoyo que permiten la obtención de los datos 3D en un sistema local. Este es un aspecto fundamental en estudios basados en la comparación de una serie temporal de datos relativos a una misma zona. La determinación de los puntos de apoyo ha supuesto un incremento de trabajo frente a

la simplicidad característica de la metodología SfM, pero a cambio ha permitido la obtención de datos referenciados.

Esto reduce el tipo de programas y aplicaciones SfM adecuadas para los estudios comparativos de MDE a las que ofrecen opciones de orientación mediante marcado de puntos de apoyo en las imágenes, método más preciso que la orientación posterior de la nube de puntos obtenida. En esta tesis se han probado dos aplicaciones; una de ellas, PhotoScan, permite esta opción de orientación mediante puntos de apoyo, y ha ofrecido unos resultados aceptables, con un EMC medio de 0.6 mm (0.2 mm en la coordenada Z) en la orientación de las seis nubes de puntos generadas. La otra aplicación utilizada, 123DCatch, no permite esta opción; los MDE obtenidos han presentado en algunos casos deformaciones y zonas dobles, y finalmente se han desestimado. No se descarta totalmente su uso en este tipo de estudios, pues algunos investigadores la han empleado con éxito en trabajos a menor escala; habría que realizar más pruebas, considerando por ejemplo distintas configuraciones de imágenes.

La densidad media de las nubes de puntos obtenidas mediante SfM ha sido muy alta, suficiente para la generación de MDE interpolados de resolución milimétrica.

La comprobación de la exactitud de las nubes de puntos obtenidas según el procedimiento habitual de comparar las mediciones de un conjunto de puntos de control ubicados sobre la superficie era en este estudio inviable, pues al tratarse de una superficie en continuo cambio, los puntos no serían fijos de una simulación de lluvia a otra; además la ubicación de cualquier elemento sobre la superficie podría modificar el flujo erosivo sobre ella, dando lugar a formas modificadas de relieve. Se optó por obtener una superficie de referencia mediante un escáner láser, para la comparación posterior del modelo obtenido mediante fotogrametría. La comparación de las nubes de puntos obtenidas mediante imágenes con las nubes de puntos obtenidas con un escáner láser muestra distancias medias entre ellas con SD inferior a 0.5 mm. Si bien este valor es aceptable, se aprecian diferencias en la morfología de las superficies obtenidas en los dos métodos. Esto puede deberse a la elección del escáner láser, cuya resolución no ha resultado suficiente para el rango de variaciones reales de elevación obtenidas tras los episodios de lluvia sobre la bandeja de suelo.

Se ha aplicado la técnica de diferencias de MDE para realizar una estimación del cambio de volumen experimentado por la superficie del suelo con los sucesivos episodios de lluvia. La diferencia directa entre dos MDE ofrece unos valores de diferencias de elevación que necesitan ser clasificados para distinguir los cambios reales del error asociado a la determinación de las superficies. Esta determinación de la incertidumbre es necesaria sobre todo en casos como este, en el que la magnitud de los posibles cambios es similar a la magnitud de los errores. Se ha empleado un criterio de umbralización de los cambios basado en el error estimado en la diferencia de MDE a partir de la composición cuadrática de los errores individuales de cada MDE. Los resultados varían significativamente con la introducción de este umbral, obteniendo estimaciones de volumen un 60% menores respecto al volumen de la diferencia directa. Estos valores confirman la importancia de establecer una adecuada modelización del error en los DoD.

La recogida de la escorrentía producida durante el experimento de simulación de lluvia permitió obtener la cantidad de sedimento arrastrado fuera de la bandeja y tener así un valor de referencia con el que comparar los resultados de la estimación de erosión a partir del volumen de cambio calculado. Se ha observado una aceptable correlación entre ambos, sobre todo considerando el resultado acumulado de las cinco simulaciones de lluvia. La cantidad de sedimento acumulado estimada presenta una discrepancia con la cantidad real recogida en la escorrentía, un 18% menor (sin tener en cuenta el sedimento recogido en la infiltración). Este resultado reafirma la importancia de la determinación del umbral significativo en los DoD; a pesar de todo, se valora positivamente la adecuación de este método y su utilidad en investigaciones en este ámbito.

Las discrepancias entre sedimento estimado a partir de DoD y sedimento recogido observadas en los episodios intermedios pueden deberse al asentamiento o compactación del suelo de la bandeja, aumentando la diferencia de volumen sin pérdida de sedimentos. Un análisis más profundo tendrá que considerar factores como la composición del suelo, la densidad aparente inicial y las características de la lluvia aplicada.

Las conclusiones finales de este trabajo son:

- Un procedimiento fotogramétrico basado en técnicas *Structure from Motion* resulta adecuado para estudios de erosión hídrica en laboratorio a partir de diferencias de modelos digitales de elevaciones.
- La metodología de trabajo propuesta en esta tesis proporciona un marco claro y riguroso para el cálculo de tasas de erosión.
- El programa informático elegido (Photoscan) proporciona el entorno de trabajo más adecuado teniendo en cuenta las necesidades fotogramétricas y la sencillez de uso y automatización del proceso.
- Las diferencias de MDE de precisión junto con parámetros edáficos como la densidad aparente permiten estimar tasas de erosión comparables a datos obtenidos experimentalmente.
- La determinación del umbral de los DoD es un factor determinante para la buena aplicación del procedimiento.
- EL desarrollo de una herramienta propia, *DEM Difference*, para la realización de las diferencias de MDE en ArcMap ha facilitado considerablemente el procedimiento.

5.2 Líneas futuras y mejoras

El procedimiento establecido en esta tesis se puede ampliar con nuevas experimentaciones que contribuirán a mejorar el conjunto. En este apartado se proponen algunas líneas de mejora que se podrán desarrollar en el futuro.

- Realización de un diseño del experimento riguroso que tenga en cuenta algunos factores que pueden influir en el resultado: modelo de cámara, asentamiento del terreno, determinación de la densidad aparente.
- Establecimiento de un sistema de referencia local mediante la ubicación de señales codificadas fijas de coordenadas conocidas (medidas por métodos topográficos) que permitan realizar la medición en las imágenes de forma automática, para mejorar la precisión en la orientación absoluta de las imágenes.

- Diseño de un sistema de adquisición de puntos de control que permitan determinar la calidad de los MDEs obtenidos por fotogrametría. Puesto que la superficie de la parcela experimental no puede sustentar los puntos, se tendría que pensar por ejemplo en una estructura fija, como un banco de calibración portátil, que se pueda captar en las imágenes al mismo tiempo que la superficie.
- Realización de nuevos experimentos en los que se varíen parámetros como la intensidad de lluvia o el tipo de suelo para analizar su comportamiento.
- Desarrollo de una metodología para la determinación de cambios significativos en las diferencia de MDE mediante umbrales probabilísticos, con el fin de ajustar de forma más precisa las valoraciones del método.
- Implementación de nuevas funcionalidades en la herramienta propia *DEM Difference* que permitan aplicar distintos umbrales significativos: umbral mínimo, umbrales probabilísticos.
- Diseño de scripts Python para adaptar el proceso de trabajo en PhotoScan al procedimiento establecido en esta tesis para la obtención de las nubes de puntos de la bandeja de suelo y su exportación en el formato requerido para su uso en ArcMap.

Bibliografía

- Abd Elbasit, M., Yasuda, H., y Anyoji, H. (2008). Development and application of digital elevation model rectification method in monitoring soil microtopography changes during rainfall. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 21(2):114–125.
- Abd Elbasit, M. A., Anyoji, H., Yasuda, H., y Yamamoto, S. (2009). Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification. *Hydrological processes*, 23(10):1408–1417.
- Abd Elbasit, M. A. M., Yasuda, H., Salmi, A., y Ahmad, Z. (2011). Impact of rainfall microstructure on erosivity and splash soil erosion under simulated rainfall. En Godone, D., editor, *Soil Erosion Studies*, pp. 167–178. In Tech.
- Afana, A., Solé-Benet, A., Pérez, J., Gilkes, R., y others (2010). Determination of soil erosion using laser scanners. En *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world: Brisbane, Australia, International Union of Soil Sciences*, pp. 39–42.
- Agassi, M. y Bradford, J. (1999). Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil and Tillage Research*, 49(4):277–287.
- Agisoft (2014). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.1*.
- Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M. A., y Carvajal, F. (2005). Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(7):805–816.

- Almorox Alonso, J., López Bermúdez, F., y Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*. Murcia: Editum. Universidad de Murcia.
- Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Navas, A., y Machín, J. (2012). Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology*, 175:38–44.
- Armstrong, A., Quinton, J., Heng, B., y Chandler, J. (2011). Variability of interrill erosion at low slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1):97–106.
- ASPRS (2004). *Manual of Photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- AutoDesk (2015). Learn how to use 123D Catch. [En línea].<http://www.123dapp.com/howto/catch>. [Consulta: 25-4-2015].
- Balaguer Puig, M. (2011). Caracterización del láser escáner ScanStation2: Relación entre intensidad y color. Trabajo de investigación de doctorado, Universitat Politècnica de València.
- Barazzetti, L., Scaioni, M., y Remondino, F. (2010). Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132):356–381.
- Bauer, T., James, M. R., McShane, G., Quinton, J. N., y Strauss, P. (2015). Intra-rainfall soil surface change detection using close-range photogrammetry. En *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volumen 17, p. 1587.
- Benito, E., De Blas, E., Santiago, J., y Varela, M. (2001). Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 26:211–220.
- Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., y Schlunegger, F. (2010). Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(12):1456–1467.
- Bertuzzi, P., Caussignac, J., Stengel, P., Morel, G., Lorendeau, J., y Pelloux, G. (1990). An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Science*, 149(3):169–178.

- Betts, H. D. y DeRose, R. C. (1999). Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1(2):91–101.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., Castillo, V., y Albaladejo, J. (2006). Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 78(3):267–285.
- Bollinne, A. (1975). La mesure de l'intensité du splash sur sols limoneux. Mise au point d'une technique de terrain et premiers résultats. *Pedologie*, 25:199–210.
- Brasington, J. y Smart, R. (2003). Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3):231–247.
- Bretar, F., Arab-Sedze, M., Champion, J., Pierrot-Deseilligny, M., Heggy, E., y Jacquemoud, S. (2013). An advanced photogrammetric method to measure surface roughness: Application to volcanic terrains in the Piton de la Fournaise, Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 135:1–11.
- Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogram. Eng. Remote Sens*, 37:855–866.
- Burke, S. (2001). Regression and Calibration. *LCGC Europe*, January:13–18.
- Burrough, P. A. y McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Butler, J., Lane, S., y Chandler, J. (1998). Assessment of DEM quality for characterizing surface roughness using Close Range Digital Photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 16(92):271–291.
- Calvo, A., Gisbert, J., Palau, E., y Romero, M. (1988). Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, 1:6–15.
- Carlisle, B. H. (2005). Modelling the spatial distribution of DEM error. *Transactions in GIS*, 9(4):521–540.
- Castillo, C., Zarco-Tejada, P., Laredo, M., y Gómez, J. A. (2013). Quantification of gully volume using very high resolution DSM generated through 3D reconstruction from airborne and field digital

- imagery. *European Geosciences Union General Assembly, Vienna, April*, pp. 7–12.
- Centeno, J. D., Moya, M. E., y Hernández, M. A. D. P. (2006). ¡Hazlo tú mismo ... y sácale partido a la escasez! Un caso real en la enseñanza práctica de la geomorfología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 14:259–264.
- Cerdà, A. (1999). Simuladores de lluvia y su aplicación a la geomorfología. Estado de la cuestión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 25:45–84.
- Cerdà, A., Ibáñez, S., y Calvo, A. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11(2):163–170.
- Chan, K. Y. (2006). Bulk density. En *Encyclopedia of Soil Science, Second Edition*, pp. 191–193. CRC Press.
- Chandler, J. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1):51–63.
- Chandler, J. y Fryer, J. (2013). Autodesk 123d catch: how accurate is it. *Geomatics World*, 2(21):28–30.
- Chueca Pazos, M., Herráez Boquera, J., y Berné Valero, J. L. (1996). *Tratado de topografía. Teoría de errores e instrumentación*, volumen 1. Madrid: Paraninfo.
- Church, M. (2010). The trajectory of geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 34(3):265–286.
- Collin, R. y Chisholm, N. (1991). Geomorphological photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 13(78):845–854.
- Covert, A. y Jordan, P. (2009). A portable rainfall simulator: techniques for understanding the effects of rainfall on soil erodibility. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 13(1):5–9.
- Cuartero, A., Felicísimo, A., y Ariza, F. (2001). Análisis del error en modelos digitales de elevaciones según la fuente de datos. *XIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica, Badajoz*.

- Darboux, F. y Huang, C.-h. (2003). An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography. *Soil Science Society of America Journal*, 67(1):92–99.
- Deseilligny, M. P. y Clery, I. (2011). Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. En *Proceedings of the ISPRS Symposium, 3DARCH11*, pp. 269–277.
- Discover Armfield (2015). Engineering teaching & research equipment. [En línea]. <http://discoverarmfield.com>. [Consulta: 21-1-2015].
- Edibon (2015). Edibon technical teaching equipment. [En línea]. <http://www.edibon.com/products/catalogues>. [Consulta: 21/1/2015].
- Ellison, W. (1944). Two devices for measuring soil erosion. *Agricultural engineering*, 25(2):53–55.
- EOS System Inc. (2015). Photomodeler Scanner. [En línea]. <http://www.photomodeler.com> [Consulta: 25-1-2015].
- Erdogan, S. (2009). A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(3):366.
- ESRI (2004). Interpolating surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. [En línea]. <http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>. [Consulta: 21/5/2015].
- ESRI (2012). Arcgis 10.1 help. user's manual.
- Fisher, P. F. y Tate, N. J. (2006). Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30(4):467–489.
- Florinsky, I. V. (2012). *Digital terrain analysis in soil science and geology*. USA: Academic Press.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., y Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4):421–430.
- Förstner, W. (1986). A feature based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26(3):150–166.

- Fraser, C. (1996). Network design. *Close range photogrammetry and machine vision*, pp. 256–281.
- García Moreno, R., Álvarez, M., Alonso, A. T., Barrington, S., y Requejo, A. S. (2008). Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions. *Soil and tillage research*, 98(1):35–44.
- GeomáticaES (2015). Qué es la geomática. [En línea]. <http://geomaticea.com/>. [Consulta: 27-8-2015].
- Gessesse, G. D., Fuchs, H., Mansberger, R., Klik, A., y Rieke-Zapp, D. H. (2010). Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 25(131):299–318.
- Girardeau-Montaut, D. (2014). CloudCompare: 3D Point Cloud and Mesh Processing Software. Open Source Project. [En línea]. Consulta: 6-5-2015].
- Gómez González, E. (2012). *Guía para conocer las cámaras de fotografía digital*. Sevilla: Victoria.
- Gómez-Gutiérrez, Á., de Sanjosé-Blasco, J. J., de Matías-Bejarano, J., y Berenguer-Sempere, F. (2014a). Comparing two photo-reconstruction methods to produce high density point clouds and DEMs in the Corral del Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Spain). *Remote Sensing*, 6(6):5407–5427.
- Gómez-Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Berenguer-Sempere, F., Lavado-Contador, F., y Rubio-Delgado, J. (2014b). Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. *CATENA*, 120:91–101.
- Goodchild, M. F. (2010). Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, (1):3–20.
- Gorchichko, G. (1976). Device for determining the amount of soil splashed by raindrops. *Soviet soil science*.
- Grismer, M. E. (2011). Rainfall simulation studies - a review of designs, performance and erosion measurement variability. Informe técnico, University of California, Davis.
- Hancock, G. y Willgoose, G. (2001). The interaction between hydrology and geomorphology in a landscape simulator experiment. *Hydrological Processes*, 15(1):115–133.

- Harris, C. y Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detector. En *Alvey vision conference*, volumen 15, p. 50. Citeseer.
- Haubrock, S.-N., Kuhnert, M., Chabrillat, S., Güntner, A., y Kaufmann, H. (2009). Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning. *Catena*, 79(2):128–139.
- Heng, B. P., Chandler, J. H., y Armstrong, A. (2010). Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies. *The Photogrammetric Record*, 25(131):240–265.
- Hengl, T. y Reuter, H., editores (2008). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, volumen 33 de *Developments in Soil Science*. Amsterdam: Elsevier, Amsterdam.
- Höhle, J. y Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4):398–406.
- Huang, C.-h. y Bradford, J. M. (1992). Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1):14–21.
- Humphry, J., Daniel, T., Edwards, D., y Sharpley, A. (2002). A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(2):199–204.
- Ibáñez Asensio, S. (2001). *Estudio de la erosión hídrica en suelos desarrollados sobre margas: métodos de estima en bancales abandonados*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., y Gisbert Blanquer, J. M. (2012). El uso de un simulador de lluvia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/16571>.
- International Society for Geomorphometry (2015). *Geomorphometry: The science of digital terrain analysis*. [En línea]. <http://geomorphometry.org/>. [Consulta: 30-3-2015].
- Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H., y Ries, J. (2012). A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil and Tillage Research*, 124:131–137.
- Iserloh, T., Ries, J., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., y Geißler, C. (2013).

- European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. *Catena*, 110:100–112.
- ISPRS (2010). Tips for the effective use of close range digital photogrammetry for the earth sciences. En *Commission V - Working Group V/6 - Close range morphological measurement for the earth sciences*.
- James, M. y Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003–2012)*, 117(F3).
- Jester, W. y Klik, A. (2005). Soil surface roughness measurement methods, applicability, and surface representation. *Catena*, 64(2):174–192.
- Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., y Schmidt, J. (2014). Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex moroccan gully morphology using structure from motion. *Remote Sensing*, 6(8):7050–7080.
- Kersten, T. P. y Lindstaedt, M. (2012). Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects. En *Progress in cultural heritage preservation*, pp. 1–10. Springer.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Kuipers, H. (1957). A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci*, 5(4):255–262.
- Lague, D., Brodu, N., y Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82:10–26.
- Lane, S., James, T., y Crowell, M. (2000). Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *The Photogrammetric Record*, 16(95):793–821.
- Lane, S., Richards, K., y Chandler, J. (1993). Developments in photogrammetry; the geomorphological potential. *Progress in Physical Geography*, 17(3):306–328.

- Lane, S. N., Westaway, R. M., y Murray Hicks, D. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3):249–271.
- Lascelles, B., Favis-Mortlock, D., Parsons, T., y Boardman, J. (2002). Automated digital photogrammetry: A valuable tool for small-scale geomorphological research for the non-photogrammetrist? *Transactions in GIS*, 6(1):5–15.
- Legout, C., Leguédois, S., Le Bissonnais, Y., e Issa, O. M. (2005). Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma*, 124(3):279–292.
- Leguédois, S., Planchon, O., Legout, C., y Le Bissonnais, Y. (2005). Splash projection distance for aggregated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1):30–37.
- Leica Geosystems (2007). Leica scanstation 2. Información de producto y especificaciones. [En línea]. <http://hds.leica-geosystems.com>. [Consulta: 16-7-2015].
- Lerma, J. L. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S., y Seguí, A. E. (2013). Modelado fotorrealístico 3d a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de arte rupestre*, 6:85–90.
- Lerma, J. L., Navarro, S., Seguí, A. E., y Cabrelles, M. (2014). Range-based versus automated markerless image-based techniques for rock art documentation. *The Photogrammetric Record*, 29(145):30–48.
- Lerma, J. L., Van Genechten, B., y Santana Quintero, M., editores (2008). *3D Risk Mapping. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning. Training Material Based on Practical Applications*. Editorial UPV, Universitat Politècnica de València.
- Li, Z. y Chen, Z. (2012). Comparing two measuring methods of soil microtopography. En *Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), 2012 First International Conference on*, pp. 1–4. IEEE.
- Li, Z., Zhu, C., y Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: principles and methodology*. Boca Raton: CRC press.

- Lindsay, J. B. y Ashmore, P. E. (2002). The effects of survey frequency on estimates of scour and fill in a braided river model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(1):27–43.
- Liu, X., Hu, J., y Ma, J. (2011). Quantitative evaluation of spatial interpolation models based on a data-independent method. En *Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience*. INTECH Open Access Publisher.
- Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. En *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*, volumen 2, pp. 1150–1157. Ieee.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2):91–110.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., y Boehm, J. (2013). *Close-range Photogrammetry and 3D imaging*. Berlin: Walter De Gruyter.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., y Harley, I. (2006). *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*. Dunbeath: Whittles.
- Martínez-Casasnovas, J. (2003). A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50(2):293–308.
- Marzloff, I. y Poesen, J. (2009). The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology*, 111(1):48–60.
- Merrill, S., Huang, C. H., Zobeck, T., y Tanaka, D. (2001). Use of the chain set for scale-sensitive and erosion relevant measurement of soil surface roughness. *Sustaining the Global Farm*, pp. 594–600.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., y Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4):473–486.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., y McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Milan, D. J., Heritage, G. L., Large, A. R., y Fuller, I. C. (2011). Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. *Geomorphology*, 125(1):160–171.

- Miller, C. L. y Laflamme, R. A. (1958). The digital terrain model: Theory & application. *Photogrammetric Engineering*, 24(3):433–442.
- Morgan, R. (1981). Field measurement of splash erosion. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 133:373–82.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. Oxford: Blackwell.
- Moritani, S., Yamamoto, T., Andry, H., Inoue, M., Nishimura, T., Fujimaki, H., Kimura, R., y Saito, H. (2011). Monitoring of soil surface under wind and water erosion by photogrammetry. En Lerner, J. C., editor, *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*, capítulo 21, pp. 447–462. InTech.
- Moulon, P. y Bezzi, A. (2011). Python Photogrammetry Toolbox: A free solution for Three-Dimensional Documentation. En *ArcheoFoss*, pp. 1–12, Napoli, Italy.
- Munster, C., Taucer, P., Wilcox, B., Porter, S., y Richards, C. (2006). An approach for simulating rainfall above the tree canopy at the hillslope scale. *Transactions of the ASABE*, 49(4):915–924.
- Nadal Romero, E., Revuelto, J., Errea, P., López Moreno, J. I., y María García Ruiz, J. (2014). Erosion and deposition processes determined by terrestrial laser scanner and photogrammetric techniques. En *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volumen 16 de *EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 135.
- Nguyen, H. M., Wünsche, B., Delmas, P., y Lutteroth, C. (2012). 3d models from the black box: investigating the current state of image-based modeling. En *WSCG 2012 Communication Proceedings*, pp. 249–258. Václav Skala-UNION Agency.
- Nouwakpo, S. K., Huang, C.-h., Frankenberger, J., y Bethel, J. (2010). A simplified close-range photogrammetry method for soil erosion assessment. En *2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas*.
- Nouwakpo, S. K., James, M. R., Weltz, M. A., Huang, C.-H., Chagas, I., y Lima, L. (2014). Evaluation of structure from motion for soil microtopography measurement. *The Photogrammetric Record*, 29(147):297–316.

- Parsons, A. J. y Lascelles, B. (2000). Rainfall simulation in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(7):679–679.
- Paz González, A. y Vidal Vázquez, E. (2003). Evolución del microrrelieve de la superficie del suelo medido a diferentes escalas. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, VI.
- Pears, N., Liu, Y., y Bunting, P. (2012). *3D imaging, analysis and applications*, volumen 3. London: Springer.
- Pérez, R., Jiménez, L., Garcia-Estringana, P., Marqués, M., Chicharro, M., González, S., Alegre, J., y Bienes, R. (2003). Calibración de un simulador de lluvia para estudios de degradación del suelo. *Edafología*, 10(2):247–254.
- Photosynth, M. (2015). [En línea]. <https://photosynth.net/> [Consulta: 30-4-2015].
- Pike, R., Evans, I., y Hengl, T. (2009). Geomorphometry: A brief guide. En Hengl, T. y Reuter, H. I., editores, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, volumen 33 de *Developments in Soil Science*, pp. 3 – 30. Elsevier.
- Pike, R. J. (2002). A bibliography of terrain modeling (Geomorphometry), the quantitative representation of topography. *USGS Open file report*, pp. 02–465.
- Podmore, T. y Huggins, L. (1981). An automated profile meter for surface-roughness measurements. *Transactions of the ASAE*, 24(3):663.
- Prosdocimi, M., Calligaro, S., Sofia, G., Dalla Fontana, G., y Tarolli, P. (2015). Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI:10.1002/esp.3767.
- Remondino, F. y El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D Modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21(115):269–291.
- Reuter, H., Hengl, T., Gessler, P., y Soille, P. (2009). Preparation of DEMs for geomorphometric analysis. En Hengl, T. y Reuter, H. I., editores, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, volumen 33 de *Developments in Soil Science*, pp. 87 – 120. Elsevier.

- Řezníček, J. (2014). Measuring repeatability of the focus-variable lenses. *Geoinformatics FCE CTU*, 13:9–18.
- Rieke-Zapp, D., Tecklenburg, W., Peipe, J., Hastedt, H., y Haig, C. (2009). Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras. Comparing mechanical stabilisation versus parameterisation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(3):248–258.
- Rieke-Zapp, D., Wegmann, H., Santel, F., y Nearing, M. (2001). Digital photogrammetry for measuring soil surface roughness. En *Proceedings of the year 2001 annual conference of the American Society for Photogrammetry & Remote Sensing ASPRS*, pp. 23–27.
- Rieke-Zapp, D. H. y Nearing, M. A. (2005). Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record*, 20(109):69–87.
- Ries, J., Iserloh, T., Seeger, M., y Gabriels, D. (2013). Rainfall simulations—constraints, needs and challenges for a future use in soil erosion research. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 57(1):1–10.
- Rosso de Luna, I. (1965). La geomorfometría o estudio matemático-estadístico del relieve en geomorfología. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, 63:267–287.
- Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6):527–529.
- Sánchez Cohen, I. y Asseline, J. (1999). Tipos de simuladores de lluvia. En *Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos*, Libro Científico - CENID-RASPA, capítulo IV, pp. 27–56. CENID-RASPA.
- Sancho, C., Benito, G., y Gutiérrez, M. (1991). *Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos*. Cuadernos Técnicos de la S.E.G. n 2. Logroño: Geoforma Ediciones.
- Schneider, A., Gerke, H. H., y Maurer, T. (2011). 3d initial sediment distribution and quantification of mass balances of an artificially-created hydrological catchment based on dems from aerial photographs using gocad. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(1):87–100.

- SFMTToolkit (2015). [En línea]. <https://github.com/dddExperiments/SFMTToolkit> [Consulta: 25-8-2015].
- Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation. *Interpreting multivariate data*, 21:21–36.
- Smith, M. W. y Vericat, D. (2015). From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from structure-from-motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12):1656–1671.
- Smith, S., Holland, D., y Longley, P. (2005). Quantifying interpolation errors in urban airborne laser scanning models. *Geographical Analysis*, 37(2):200–224.
- Snapir, B., Hobbs, S., y Waine, T. (2014). Roughness measurements over an agricultural soil surface with structure from motion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96:210–223.
- Snavely, K. N. (2008). *Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections*. Tesis doctoral, University of Washington.
- Snavely, N., Seitz, S. M., y Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2):189–210.
- Stroosnijder, L. (2005). Measurement of erosion: is it possible? *Catena*, 64(2):162–173.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, C: División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- Szeliski, R. (2010). *Computer vision: algorithms and applications*. London: Springer.
- Ullman, S. (1979). The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 203(1153):405–426.
- United States Department of Agriculture (2015). Soil quality indicator sheets: Bulk density. [En línea]. <http://www.nrcs.usda.gov>. [Consulta: 30-4-2015].

- Valette, G., Prévost, S., Lucas, L., y Léonard, J. (2006a). Simulation of rain splash using a genetic fuzzy system. En *11th IPMU International Conference. Paris*.
- Valette, G., Prévost, S., Lucas, L., y Léonard, J. (2006b). SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers & Graphics*, 30(4):494–506.
- Van Dijk, A., Bruijnzeel, L., y Rosewell, C. (2002a). Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261(1):1–23.
- Van Dijk, A., Meesters, A., y Bruijnzeel, L. (2002b). Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5):1466–1474.
- Waldhäusl, P. y Ogleby, C. (1994). 3 x 3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30:426–429.
- Wang, P. y Pruppacher, H. (1977). Acceleration to terminal velocity of cloud and raindrops. *Journal of Applied Meteorology*, 16(3):275–280.
- Webster, R. y Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Welch, R. y Dijkers, K. (1978). Educational and research aspects of non-metric, close range analogue photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 9(52):537–547.
- Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., y Haala, N. (2013). Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W1:251–258.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., y Reynolds, J. (2012). Structure-from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179:300–314.
- Wheaton, J. (2008). *Uncertainty in Morphological Sediment Budgeting of Rivers*. Tesis doctoral, University of Southampton.
- Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., y Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys:

- improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2):136–156.
- Williams, R. D. (2012). Dems of difference. *Geomorphological Techniques (Online Edition)*, edited by LE Clarke, British Society for Geomorphology.[Available at <http://www.geomorphology.org.uk>].
- Wilson, J. P. (2012). Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137(1):107 – 121. Geospatial Technologies and Geomorphological Mapping Proceedings of the 41st Annual Binghamton Geomorphology Symposium.
- Wise, S. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological processes*, 14(11-12):1909–1929.
- Wu, C. (2015). VisualSFM : A Visual Structure from Motion System. [En línea].<http://ccwu.me/vsfm/> [Consulta: 25-8-2015].
- Yang, M.-D., Chao, C.-F., Huang, K.-S., Lu, L.-Y., y Chen, Y.-P. (2013). Image-based 3D scene reconstruction and exploration in augmented reality. *Automation in Construction*, 33:48–60.

Anexos

Anexo A

Cálculo de sedimentos

Nº filtro	Bote	Peso filtro g	Peso filtro + suelo g	Peso suelo g	Volumen ml	Escorrentía l/h	Tasa erosión g/l g/m ²	Inicio h:mm	Final h:mm	T seg
Simulación 4										
		Inicio:	14:40	Final:	15:40	Duración:	60 min			
16	Q16	3.665	8.548	4.883	2242	13.45	2.178	14:40	14:50	600
17	Q17	3.953	30.393	26.44	2334	28.01	11.328	14:50	14:55	300
18	Q18	3.954	12.185	8.231	992	11.90	8.297	14:55	15:00	300
19	Q19	3.682	11.575	7.893	1054	21.08	7.489	15:00	15:03	180
20	Q20	3.849	12.357	8.508	1062	21.24	8.011	15:03	15:06	180
21	Q21	3.769	5.755	1.986	1042	20.84	1.906	15:06	15:09	180
22	Q22	3.877	20.961	17.084	1050	15.75	16.270	15:09	15:13	240
23	Q23	3.988	15.544	11.556	1066	21.32	10.841	15:13	15:16	180
24	Q24	3.673	12.044	8.371	1112	16.68	7.528	15:16	15:20	240
25	Q25	3.552	10.596	7.044	1078	21.56	6.534	15:20	15:23	180
26	Q26	3.803	13.427	9.624	1055	15.83	9.122	15:23	15:27	240
27	Q27	3.718	14.138	10.42	1133	22.66	9.197	15:27	15:30	180
28	Q28	3.834	5.375	1.541	1146	17.19	1.345	15:30	15:34	240
29	Q29	3.854	18.629	14.775	1097	16.46	13.469	15:34	15:38	240
30	Q30	3.699	12.754	9.055	1014	30.42	8.930	15:38	15:40	120
		Total:		147,411	18477					
		Promedio:	16:35	Final:	17:35	Duración:	60 min	19.63	8.163	19.655
Simulación 5										
		Inicio:	16:35	Final:	17:35	Duración:	60 min			
30'	Q30'	3.721	5.252	1.531	1133	13.60	1.351	16:35	16:40	300
31	Q31	3.987	16.832	12.845	1146	13.75	11.209	16:40	16:45	300
32	Q32	3.961	10.459	6.498	1097	21.94	5.923	16:45	16:48	180
32'	Q32'	3.647	12.517	8.870	1014	20.28	8.748	16:48	16:51	180
32"	Q32"	3.950	13.917	9.967	1076	12.91	9.263	16:51	16:56	300
33	Q33	3.599	12.533	8.934	1072	16.08	8.334	16:56	17:00	240
34	Q34	4.023	13.344	9.321	1069	16.04	8.719	17:00	17:04	240
35	Q35	3.902	10.865	6.963	1057	15.86	6.588	17:04	17:08	240
36	Q36	3.921	13.305	9.384	1097	16.46	8.554	17:08	17:12	240
37	Q37	3.815	5.287	1.472	1120	16.80	1.314	17:12	17:16	240
38	Q38	3.934	19.485	15.551	1139	17.09	13.653	17:16	17:20	240
38'	Q38'	3.969	13.595	9.626	1128	16.92	8.534	17:20	17:24	240
39	Q39	3.980	12.458	8.478	1044	15.66	8.121	17:24	17:28	240
40	Q40	3.641	14.315	10.674	1100	16.50	9.704	17:28	17:32	240
41	Q41	3.881	12.203	8.322	1066	21.32	7.807	17:32	17:35	180
		Total:		128,436	16358					
		Promedio:		16.75	7.855	17.125				

Tabla A.2: Cálculo de sedimentos arrastrados por la infiltración

Nº filtro	Bote	Peso filtro g	Peso filtro + suelo g	Peso sedimento g	Volumen ml	Infiltración l/h	Tasa de infiltración g/l	Tasa de infiltración g/m ²	Inicio t0 minuto	Final tf minuto	Tiempo min
1	INF1	3.758	22.951	19.193	1046	1.61	18.349	38.386	20	59	39
2	INF2	4.014	4.145	0.131	1169	2.70	0.112	0.262	59	85	26
3	INF3	3.648	6.830	3.182	1156	3.47	2.753	6.364	85	105	20
4	INF4	3.842	4.205	0.363	1158	3.02	0.313	0.726	105	128	23
5	INF5	3.997	6.349	2.352	1109	2.77	2.121	4.704	128	152	24
6	INF6	3.682	3.696	0.014	1100	5.08	0.013	0.028	152	165	13
2.7	INF7	3.780	4.529	0.749	1047	2.73	0.715	1.498	165	188	23
2.8	INF8	3.824	3.998	0.174	1027	3.42	0.169	0.348	188	206	18
2.9	INF9	3.868	3.998	0.130	910	3.41	0.143	0.260	206	222	16
2.1	INF10	3.556	3.686	0.130	512	10.24	0.254	0.260	222	225	3
Total:				26.418	10234						
Promedio:						3.85	2.494	5.284			

Tabla A.3: Cálculo de la densidad aparente del suelo de la bandeja antes de la lluvia

Muestra	Peso húmedo (con cilindro) g	Peso seco (con cilindro) g	Peso cilindro g	Peso suelo g	Volumen cilindro cm ³	Densidad aparente g/cm ³
1	211.64	188.71	94.66	94.05	66.19	1.42
2	213.91	190.10	94.29	95.81	66.19	1.45
					Promedio:	1.43
	Diámetro interior cilindro (cm):		5.30			
	Altura cilindro (cm):		3.00			

Tabla A.4: Cálculo de la densidad aparente del suelo de la bandeja tras los episodios de lluvia

Muestra	Peso húmedo (con cilindro) g	Peso seco (con cilindro) g	Peso cilindro g	Peso suelo g	Volumen cilindro cm ³	Densidad aparente g/cm ³
1	209.12	188.32	93.925	94.39	66.19	1.43
2	211.64	191.96	95.014	96.95	66.19	1.46
					Promedio:	1.45

Anexo B

Establecimiento del sistema de coordenadas local

La recolección de datos de la presente tesis requiere un sistema de coordenadas cartesiano. El entorno de trabajo está situado en el interior de un invernadero, por lo que no es posible usar instrumentación GPS y complica el establecimiento de un sistema de coordenadas global con otro tipo de instrumentación.

El posicionamiento de los modelos digitales del terreno se ha llevado a cabo con un sistema de coordenadas local materializado con un conjunto de puntos marcados en el chasis del simulador de lluvia y la bandeja. El cálculo de coordenadas se ha llevado a cabo con instrumentación topográfica observando solamente ángulos. La escala del espacio objeto se ha determinado mediante la observación a una regla metálica de precisión situada en posición vertical. La posición vertical garantiza un eje Z que coincide con la vertical del lugar. La verticalidad de la regla se ha establecido simplemente dejando la regla de precisión en posición libre como si se tratara de una plomada.

El proceso de cálculo consiste en dos pasos. En el primer paso se definen las coordenadas locales de dos estaciones que forman en planta un triángulo con la proyección de la regla. Una vez determinadas

estas coordenadas se calcularán mediante intersección directa las coordenadas de los puntos de apoyo. La precisión del cálculo se puede comprobar experimentalmente observando puntos con coordenadas conocidas que en este caso no estaban disponibles. En lugar de esto se observaron los extremos de una segunda regla de precisión, cuya longitud es conocida, y se calculó la distancia entre dichos extremos a partir de las coordenadas calculadas.

Los condicionantes del sistema local han sido los siguientes:

- La regla vertical determina la escala del espacio objeto
- La proyección de la regla vertical tiene asignadas coordenadas conocidas (100, 100)
- El extremo superior de la regla tiene altitud conocida $Z = 10$
- La estación E_1 está situada a la derecha cuando la base $E_1 - E_2$ se observa desde la regla
- La estación E_2 tiene la misma coordenada Y que la proyección de la regla vertical

Estos condicionantes permiten ejecutar el cálculo tal y como se expone a continuación. En primer lugar se calcularán las coordenadas Z de las estaciones E_1 y E_2 resolviendo dos triángulos verticales. El triángulo $\widehat{ABE_1}$ se puede resolver ya que los ángulos verticales $V_{E_1}^A$ y $V_{E_1}^B$ han sido observados y la longitud del lado \overline{AB} es conocida. El ángulo en E_1 se obtiene por diferencia entre los dos ángulos observados:

$$\alpha_{E_1} = V_{E_1}^B - V_{E_1}^A$$

Los ángulos en A y B se obtienen con expresiones elementales al considerar que la vertical en el punto A coincide con las verticales de las estaciones:

$$\alpha_A = V_{E_1}^A$$

$$\alpha_B = \pi - V_{E_1}^A$$

Aplicando el teorema del seno es posible obtener el lado $\overline{AE_1}$ o $\overline{BE_1}$:

$$\overline{AE_1} = \sin \alpha_B \cdot \frac{L}{\sin \alpha_{E_1}}$$

donde L es la longitud de la regla graduada.

El desnivel entre los puntos A y E_1 es:

$$\Delta Z_A^{E_1} = -\cos V_{E_1}^A \cdot \overline{AE_1}$$

Por tanto la coordenada Z de E_1 es:

$$Z_{E_1} = 100 + \Delta Z_A^{E_1}$$

El triángulo vertical ABE_1 también permite calcular la proyección horizontal del segmento $\overline{AE_1}$:

$$\overline{AE_1} = \sin V_{E_1}^A \cdot \overline{AE_1}$$

La coordenada Z de E_2 así como la proyección horizontal de $\overline{AE_2}$ se obtiene de manera análoga sustituyendo los valores numéricos de los ángulos correspondientes en el triángulo $\overline{ABE_2}$.

El cálculo de las coordenadas planimétricas se lleva a cabo resolviendo el triángulo horizontal AE_1E_2 cuyos lados AE_1 y AE_2 se han calculado previamente. Los ángulos β_{E_1} y β_{E_2} se obtienen mediante la diferencia de las observaciones angulares horizontales:

$$\beta_{E_1} = H_{E_1}^{E_2} - H_{E_1}^A$$

$$\beta_{E_2} = H_{E_2}^{E_1} - H_{E_2}^A$$

El lado E_1E_2 se obtiene aplicando la fórmula del coseno:

$$\overline{E_1E_2} = \left[\overline{AE_1}^2 + \overline{AE_2}^2 - 2 \cdot \overline{AE_1} \cdot \overline{AE_2} \cdot \cos(\pi - \beta_{E_1} - \beta_{E_2}) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Los lados AE_1 y AE_2 se calculan bien por la fórmula del seno o por la del coseno, obteniendo idénticos resultados. El lado más importante es el AE_1 :

$$\overline{AE_2} = \sin \beta_{E_1} \cdot \frac{\overline{E_1E_2}}{\sin(\beta_{E_1} + \beta_{E_2})}$$

La coordenada X_{E_2} se obtiene de manera elemental teniendo en cuenta los condicionantes del sistema de coordenadas local:

$$X_{E_2} = X_A + \overline{AE_2}$$

La coordenada Y_{E_2} tiene un valor de 100 por definición.

Las coordenadas de E_1 se obtienen por el método de radiación desde el punto E_2 :

$$\begin{aligned} X_{E_1} &= X_{E_2} + \sin \theta_{E_2}^{E_1} \cdot \overline{E_1E_2} \\ Y_{E_1} &= Y_{E_2} + \cos \theta_{E_2}^{E_1} \cdot \overline{E_1E_2} \end{aligned}$$

donde el azimut $\theta_{E_2}^{E_1}$ se obtiene como:

$$\theta_{E_2}^{E_1} = \frac{3}{2}\pi - \beta_{E_2}$$

En este punto las coordenadas tridimensionales de las estaciones E_1 y E_2 ya están disponibles. La segunda etapa del cálculo consiste en obtener las coordenadas de los puntos de apoyo mediante el método de intersección directa. Las observaciones necesarias para el cálculo son los ángulos horizontales $H_{E_1}^P$, $H_{E_2}^P$ y los ángulos verticales $V_{E_1}^P$, $V_{E_2}^P$, donde P es el punto incógnita.

El método de intersección directa es bien conocido y sigue la siguiente secuencia de cálculo. En primer lugar se obtienen los ángulos en los vértices E_1 y E_2 :

$$\beta_{E_1} = H_{E_1}^{E_2} - H_{E_1}^P$$

$$\beta_{E_2} = H_{E_2}^P - H_{E_2}^{E_1}$$

A continuación se obtiene el azimut desde una estación hasta el punto incógnita:

$$\theta_{E_2}^P = \frac{3}{2}\pi - \beta_{E_2}$$

Y la longitud del lado correspondiente mediante la fórmula del seno. En este caso $\overline{E_2P}$ es el lado que se debe calcular:

$$\overline{E_2P} = \sin \beta_{E_1} \cdot \frac{\overline{E_1E_2}}{\sin(\beta_{E_1} + \beta_{E_2})}$$

Finalmente se aplican las fórmulas de la radiación para obtener las coordenadas planimétricas del punto incógnita:

$$\begin{aligned} X_P &= X_{E_2} + \sin \theta_{E_2}^P \cdot \overline{E_2P} \\ Y_P &= Y_{E_2} + \cos \theta_{E_2}^P \cdot \overline{E_2P} \end{aligned}$$

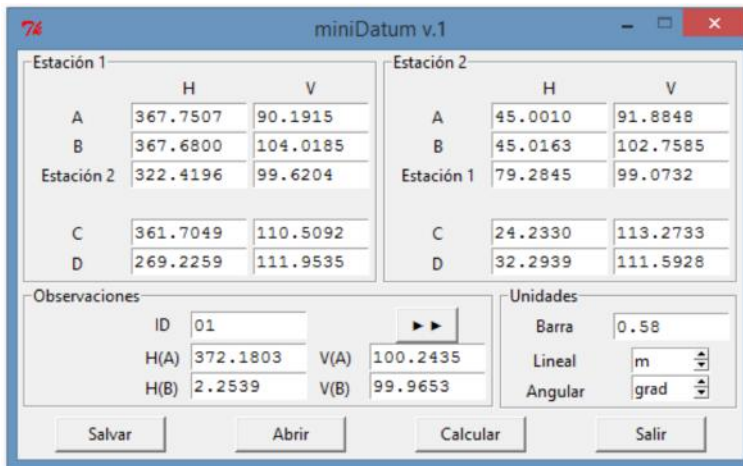
La coordenada Z del punto incógnita se puede obtener desde las dos estaciones:

$$\begin{aligned} Z_P^{E_1} &= \frac{\overline{E_1P}}{\tan V_{E_1}^P} \\ Z_P^{E_2} &= \frac{\overline{E_2P}}{\tan V_{E_2}^P} \end{aligned}$$

El valor promedio de estos dos valores será el que se utilizará como resultado definitivo.

Los cálculos descritos anteriormente se han incorporado a un programa de cálculo escrito específicamente para esta tesis. El interfaz gráfico (Figura B.1) permite introducir de manera ordenada todos los datos necesarios para el cálculo. El programa permite introducir dos puntos denominados *C* y *D* para calcular la calidad del trabajo topográfico. La calidad se estimará calculando la distancia tridimensional entre los puntos *C* y *D* y comparándola con su valor teórico. En el caso particular de este trabajo se utilizó una regla metálica graduada con longitud

nominal de 600 mm. Tras los cálculos, la longitud obtenida a partir de las coordenadas calculadas por intersección directa fue de 600.1222 mm lo cual permite establecer un sistema de coordenadas local de precisión, adecuado a los objetivos de la tesis.



Estación 1		Estación 2			
	H	V			
A	367.7507	90.1915	A	45.0010	91.8848
B	367.6800	104.0185	B	45.0163	102.7585
Estación 2	322.4196	99.6204	Estación 1	79.2845	99.0732
C	361.7049	110.5092	C	24.2330	113.2733
D	269.2259	111.9535	D	32.2939	111.5928

Observaciones		Unidades	
ID	H(A)	V(A)	Barra
01	372.1803	100.2435	0.58
	H(B)	V(B)	Lineal
	2.2539	99.9653	m
			Angular
			grad

Figura B.1: Aplicación para el cálculo de coordenadas

El listado de coordenadas de puntos de apoyo es el siguiente:

Tabla B.1: Coordenadas puntos de apoyo

2	97.627	100.355	99.248
4	99.177	100.356	99.233
8	98.667	98.949	98.962
10	98.023	98.943	98.974
P1	98.231	98.939	98.989
P2	98.513	98.944	98.985
P3	98.679	99.177	99.003
P4	98.495	99.683	99.052
P5	98.017	99.673	99.063
P6	98.011	99.159	99.013

Anexo C

Calibración de la cámara

Para la calibración de la cámara Canon EOS 1100D con el software Agisoft Lens se emplearon cinco imágenes (figura C.1).

El programa mide las esquinas de las casillas del patrón mediante un algoritmo de detección de esquinas. Se obtuvieron una media de 911 puntos medidos automáticamente sobre las imágenes (figura C.2).

Se estimaron los parámetros:

- f_x, f_y - longitud focal
- c_x, c_y - coordenadas punto principal
- K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 - coeficientes de distorsión radial y tangencial

Los resultados obtenidos se muestran en pantalla en un informe (figura C.3) en el que aparecen los valores estimados de los parámetros y su error estándar (figura C.4); se representa también de forma gráfica la distorsión radial (figura C.5) y la distorsión tangencial (figura C.6). (Estos dos gráficos que genera el programa presentan distinta escala en el eje Y; la distorsión tangencial es de pequeña magnitud, inferior a 2 pixels para la distancia radial máxima, mucho menor que la distorsión radial).

El resultado de la calibración se guarda en un fichero XML para su posterior utilización en el programa Agisoft PhotoScan (figura C.7).



Figura C.1: Imágenes del patrón de calibración

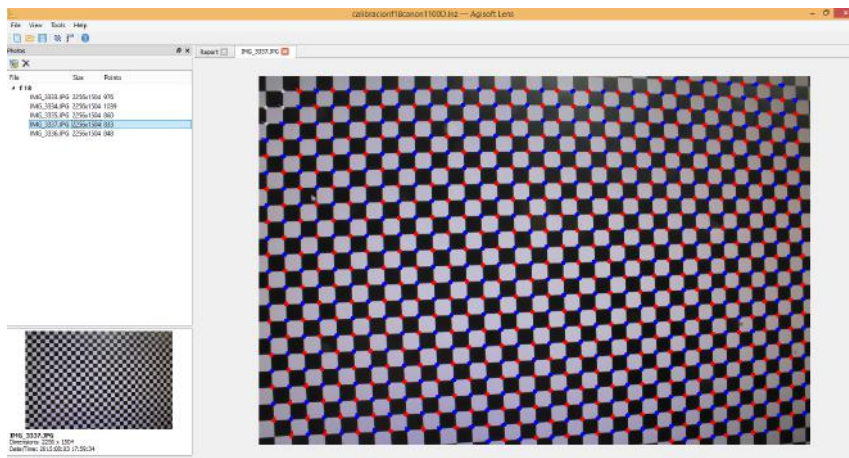


Figura C.2: Esquinas detectadas sobre el patrón de calibración

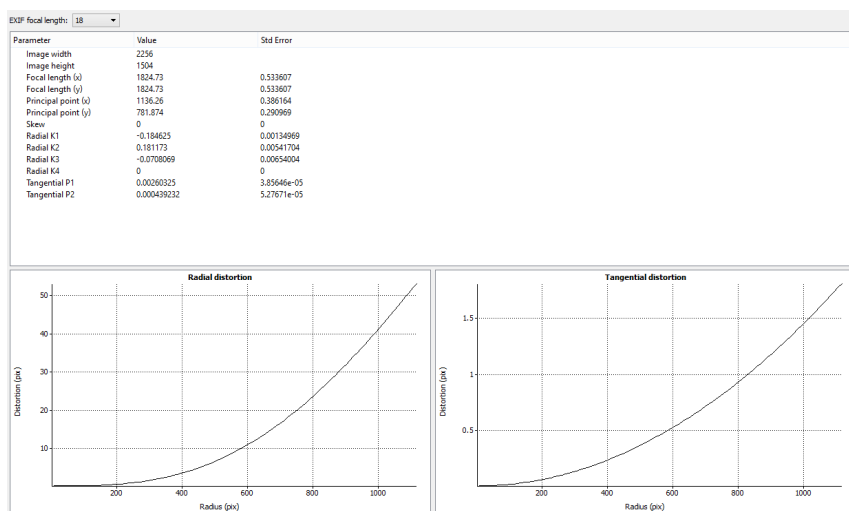


Figura C.3: Agisoft Lens: Informe de calibración de la cámara

EXIF focal length: 18

Parameter	Value	Std Error
Image width	2256	
Image height	1504	
Focal length (x)	1824.73	0.533607
Focal length (y)	1824.73	0.533607
Principal point (x)	1136.26	0.386164
Principal point (y)	781.874	0.290969
Skew	0	0
Radial K1	-0.184625	0.00134969
Radial K2	0.181173	0.00541704
Radial K3	-0.0708069	0.00654004
Radial K4	0	0
Tangential P1	0.00260325	3.85646e-05
Tangential P2	0.000439232	5.27671e-05

Figura C.4: Agisoft Lens: Parámetros de calibración de la cámara

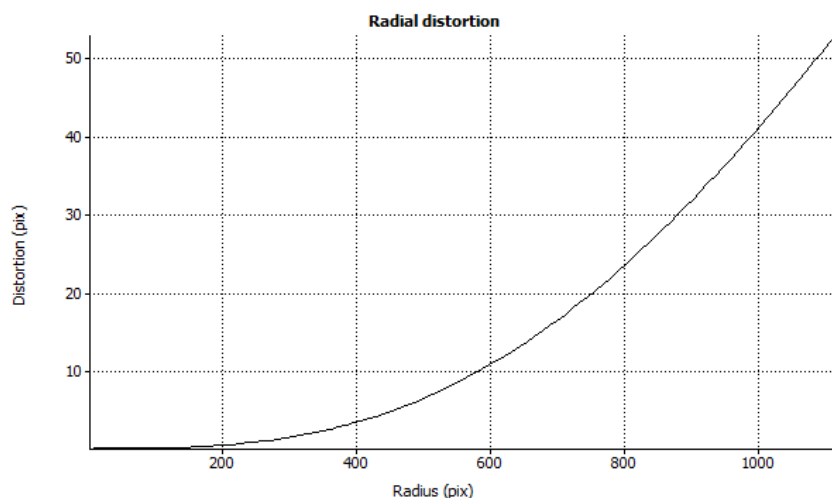


Figura C.5: Agisoft Lens: Gráfico de distorsión radial del objetivo para $f=18$ mm

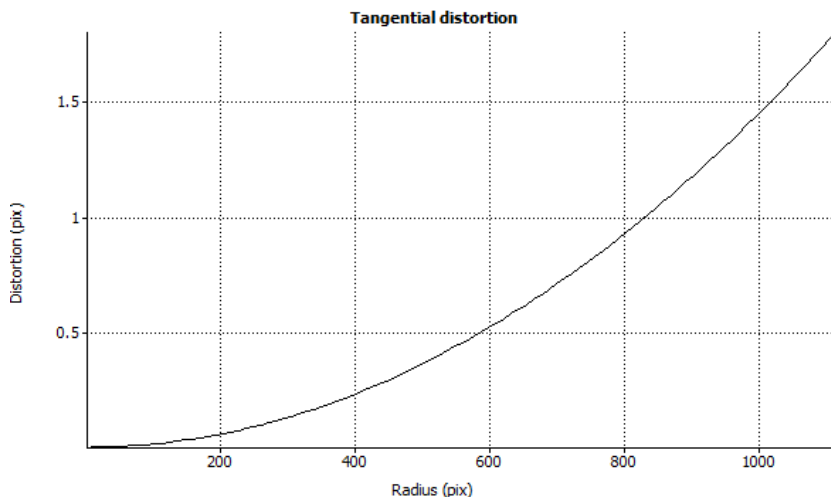


Figura C.6: Agisoft Lens: Gráfico de distorsión tangencial del objetivo para $f=18$ mm

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
-<calibration>
<projection>frame</projection>
<width>2256</width>
<height>1504</height>
<fx>1.8247267497120067e+003</fx>
<fy>1.8247267497120067e+003</fy>
<cx>1.1362621041548589e+003</cx>
<cy>7.8187438101934220e+002</cy>
<skew>0.0000000000000000e+000</skew>
<k1>-1.8462450057897462e-001</k1>
<k2>1.8117313150721179e-001</k2>
<k3>-7.0806944047088552e-002</k3>
<k4>0.0000000000000000e+000</k4>
<p1>2.6032456299593856e-003</p1>
<p2>4.3923221920156360e-004</p2>
<date>2015-09-07T17:51:05Z</date>
</calibration>
```

Figura C.7: Fichero XML con los resultados de la calibración de la cámara para $f=18$ mm

Anexo D

Informes Agisoft PhotoScan

Se incluyen los informes generados por PhotoScan de los modelos procesados.

Informe MDE0

Informe correspondiente a la obtención del modelo 0.

Agisoft PhotoScan

Processing Report
25 August 2015



Survey Data

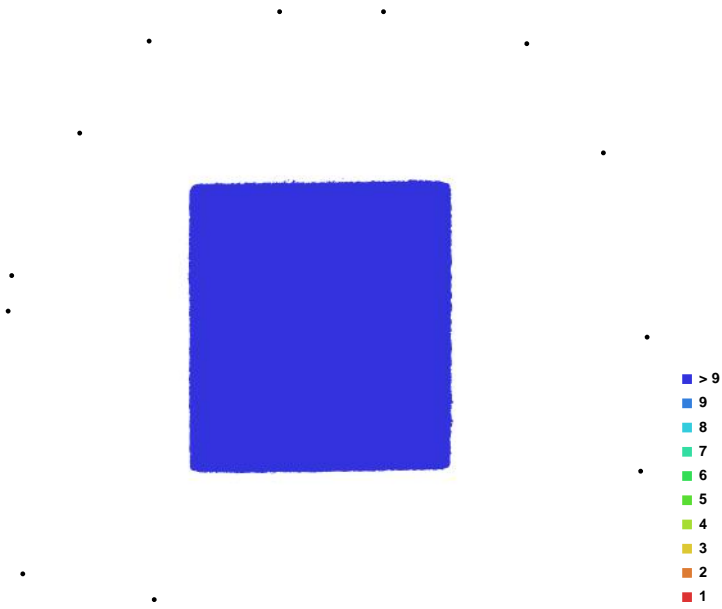


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	16	Camera stations:	16
Flying altitude:	1.86508 m	Tie-points:	25305
Ground resolution:	0.000424314 m/pix	Projections:	53919
Coverage area:	5.03701e-007 sq km	Error:	0.308399 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 1100D (18 mm)	2256 x 1504	18 mm	10.1189 x 10.1189 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

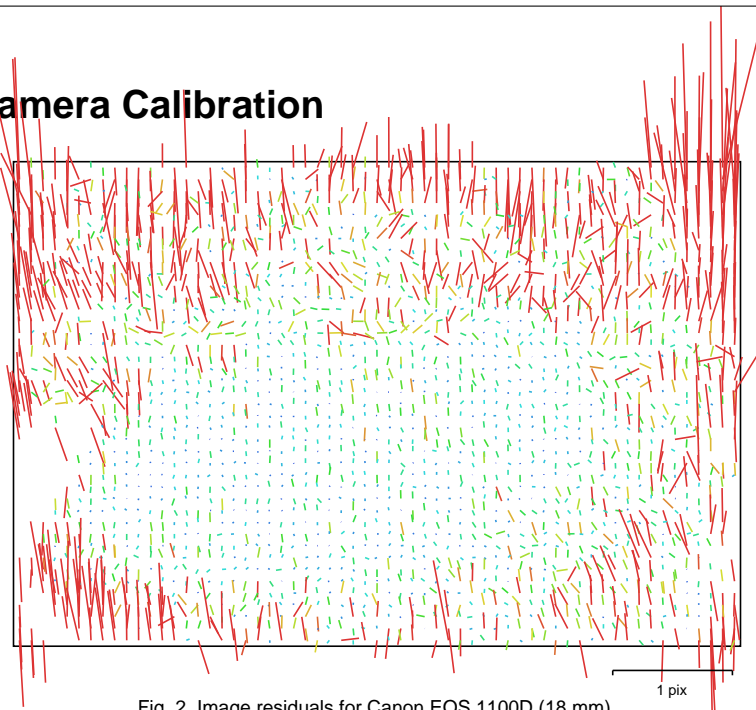


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 1100D (18 mm).

Canon EOS 1100D (18 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.16527
Fx:	1897.32	K2:	0.104298
Fy:	1932.97	K3:	0.0877108
Cx:	1124.55	K4:	0
Cy:	806.637	P1:	0.0004521
Skew:	0.26421	P2:	-0.00108193

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
8	-0.001150	-0.000376	0.000174	0.001222	5	0.218369
10	0.001179	0.000173	-0.000246	0.001217	6	0.403124
P1	0.000497	0.000794	-0.000289	0.000980	15	0.586917
P2	0.000494	0.000187	-0.000462	0.000702	8	0.734188
P3	-0.000323	-0.000477	-0.000450	0.000731	14	0.624852
P4	-0.000518	-0.000323	0.000374	0.000716	16	0.497329
P5	-0.000022	-0.000699	0.000878	0.001122	16	0.454380
P6	0.000180	-0.000495	0.000512	0.000734	15	0.629479
Total	0.000672	0.000487	0.000469	0.000954	95	0.555957

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

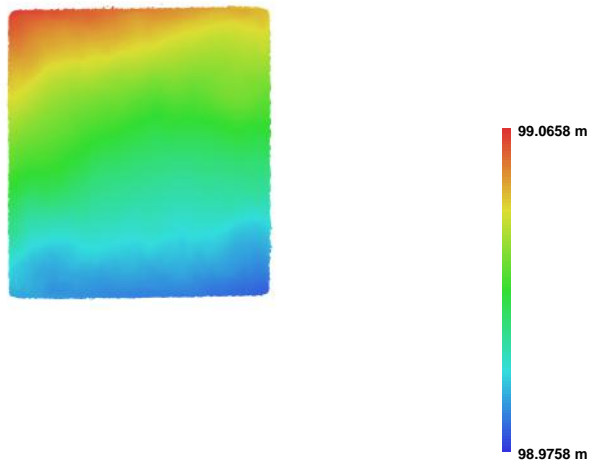


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000848627 m/pix
Point density: 1.38856e+006 points per sq m

Informe MDE1

Informe correspondiente a la obtención del modelo 1.

Agisoft PhotoScan

Processing Report

20 August 2015



Survey Data

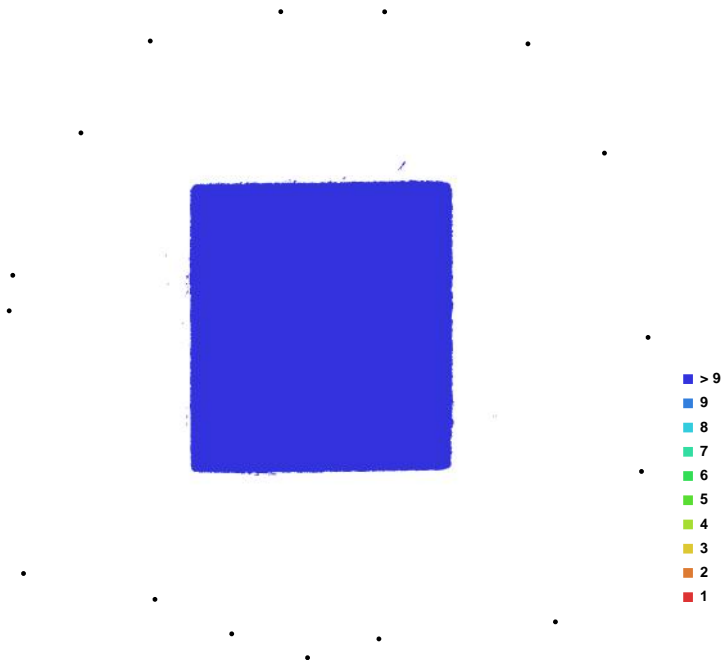


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	16	Camera stations:	16
Flying altitude:	1.86838 m	Tie-points:	25305
Ground resolution:	0.000425227 m/pix	Projections:	53919
Coverage area:	5.05438e-007 sq km	Error:	0.303087 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 1100D (18 mm)	2256 x 1504	18 mm	10.1189 x 10.1189 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

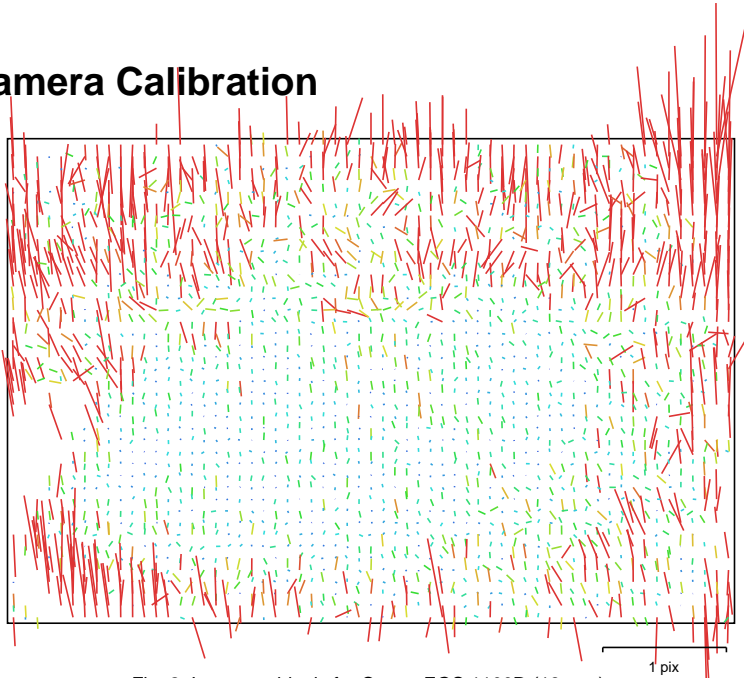


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 1100D (18 mm).

Canon EOS 1100D (18 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.167351
Fx:	1898.03	K2:	0.119608
Fy:	1929.13	K3:	0.0568319
Cx:	1122.54	K4:	0
Cy:	802.8	P1:	0.00062848
Skew:	-1.47789	P2:	-0.00116067

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
8	-0.000856	-0.000686	0.000484	0.001199	5	0.225434
10	0.000734	0.000101	-0.000292	0.000797	6	0.378041
P1	0.000249	0.000683	-0.000133	0.000739	15	0.589294
P2	0.000567	-0.000039	-0.000146	0.000587	8	0.729813
P3	0.000025	-0.000439	-0.000288	0.000526	14	0.618569
P4	-0.000218	0.000417	-0.000098	0.000481	16	0.485832
P5	-0.000271	0.000208	0.000157	0.000376	16	0.465597
P6	-0.000230	-0.000245	0.000318	0.000463	15	0.632814
Total	0.000478	0.000421	0.000269	0.000692	95	0.554315

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

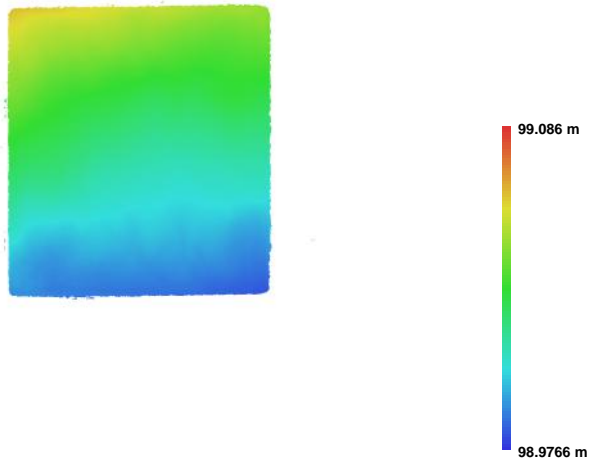


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000850454 m/pix
Point density: 1.38261e+006 points per sq m

Informe MDE2

Informe correspondiente a la obtención del modelo 2.

Agisoft PhotoScan

Processing Report
20 August 2015



Survey Data

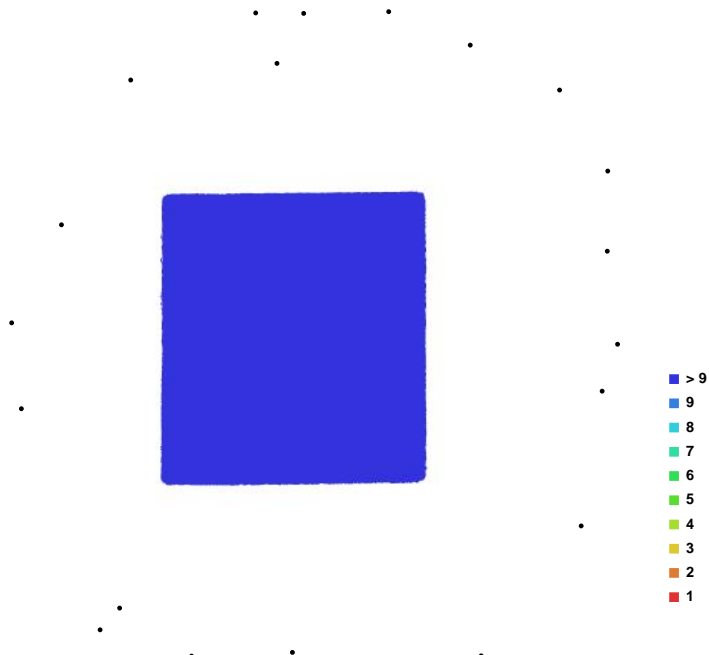


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	21	Camera stations:	21
Flying altitude:	1.21885 m	Tie-points:	63982
Ground resolution:	0.000425921 m/pix	Projections:	141272
Coverage area:	5.03323e-007 sq km	Error:	0.333353 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 1100D (18 mm)	2256 x 1504	18 mm	10.1189 x 10.1189 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

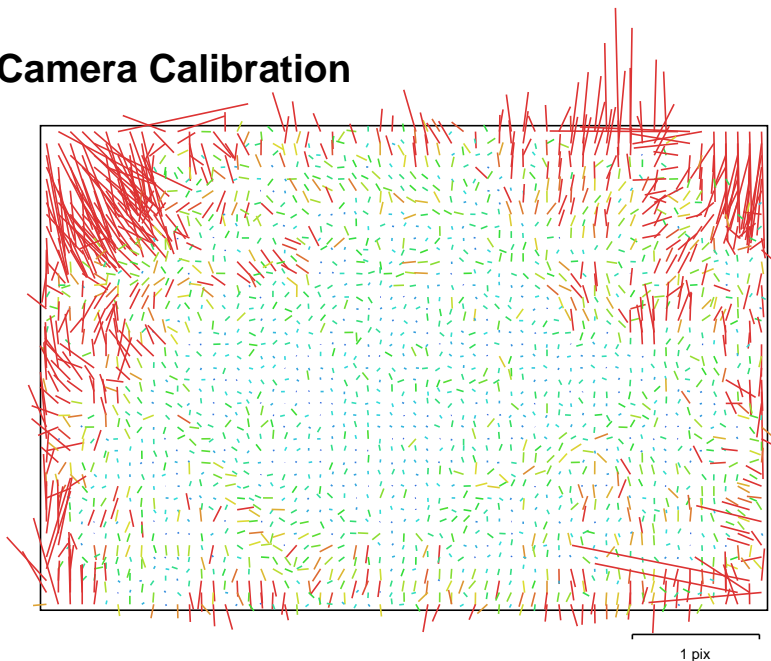


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 1100D (18 mm).

Canon EOS 1100D (18 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.178042
Fx:	1904.79	K2:	0.167395
Fy:	1923.82	K3:	-0.0399004
Cx:	1132.47	K4:	0
Cy:	772.859	P1:	0.00167494
Skew:	-8.27864	P2:	0.000559122

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
8	-0.000284	-0.000347	0.000325	0.000554	6	0.713731
10	0.000287	-0.000116	-0.000163	0.000350	6	0.696710
P1	-0.000008	0.001360	-0.000063	0.001361	18	0.454441
P4	-0.000809	0.000016	0.000044	0.000811	21	0.486290
P6	-0.000351	-0.000192	0.000243	0.000468	21	0.467723
Total	0.000434	0.000635	0.000198	0.000795	72	0.517020

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

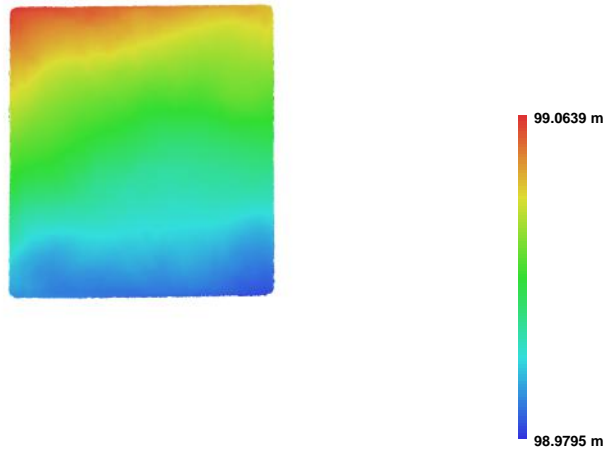


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000851843 m/pix
Point density: 1.3781e+006 points per sq m

Informe MDE3

Informe correspondiente a la obtención del modelo 3.

Agisoft PhotoScan

Processing Report

07 August 2015



Survey Data

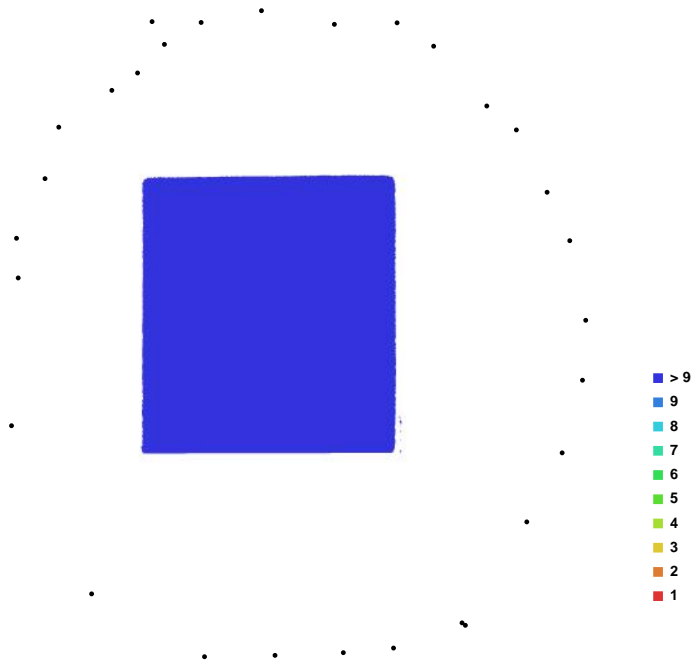


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	29	Camera stations:	29
Flying altitude:	0.898297 m	Tie-points:	117552
Ground resolution:	0.000423872 m/pix	Projections:	274965
Coverage area:	4.98107e-007 sq km	Error:	0.266027 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 1100D (18 mm)	2256 x 1504	18 mm	10.1189 x 10.1189 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

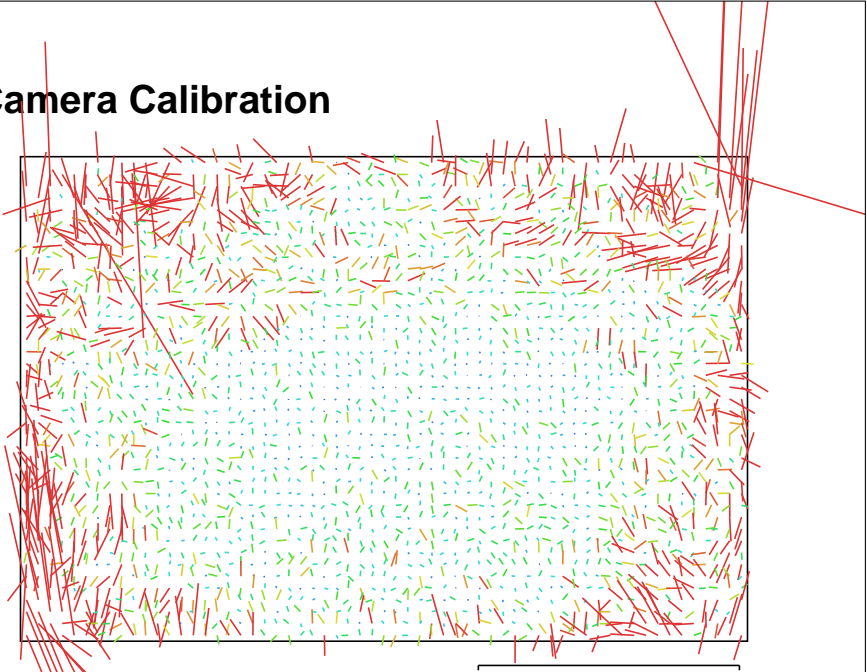


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 1100D (18 mm).

Canon EOS 1100D (18 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.189213
Fx:	1899.22	K2:	0.233075
Fy:	1902	K3:	-0.125014
Cx:	1129.58	K4:	0
Cy:	771.064	P1:	0.00240173
Skew:	-0.970929	P2:	-0.000709022

Ground Control Points

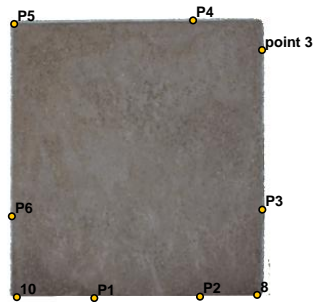


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
2	-0.000094	-0.000041	-0.000026	0.000105	7	0.271573
8	-0.000680	-0.000316	0.000111	0.000758	7	0.193958
10	0.000504	-0.000155	-0.000206	0.000566	6	0.171957
P1	-0.000214	0.000501	0.000007	0.000545	9	0.339416
P2	0.000339	0.000252	-0.000175	0.000457	9	0.396693
P3	0.000624	-0.000495	0.000031	0.000797	11	0.201177
P4	-0.000021	-0.000071	-0.000112	0.000134	15	0.344711
P5	-0.000423	0.000066	0.000059	0.000433	26	0.203714
P6	-0.000034	0.000259	0.000310	0.000405	14	0.203108
Total	0.000402	0.000291	0.000149	0.000518	104	0.264834

Digital Elevation Model

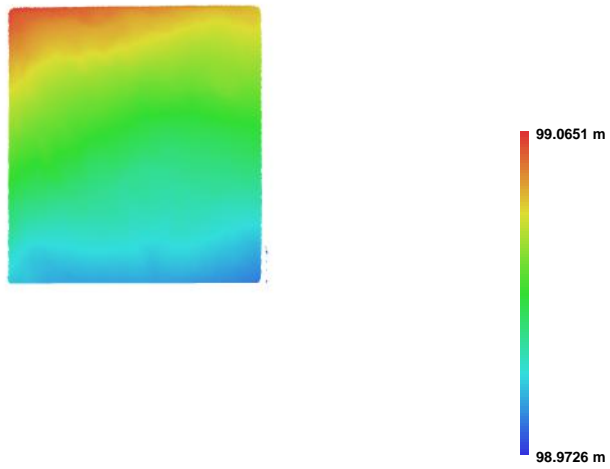


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000847743 m/pix
Point density: 1.39146e+006 points per sq m

Informe MDE4

Informe correspondiente a la obtención del modelo 4.

Agisoft PhotoScan

Processing Report

21 August 2015



Survey Data

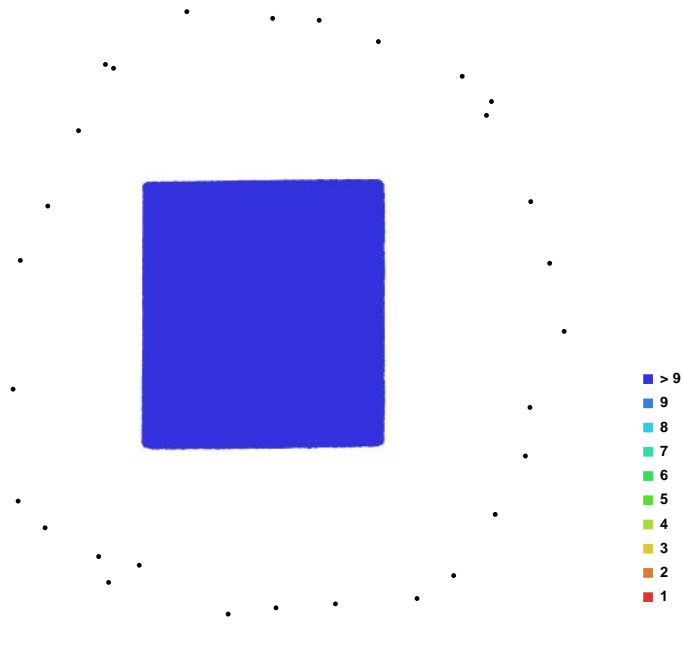


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	30	Camera stations:	30
Flying altitude:	0.996631 m	Tie-points:	130248
Ground resolution:	0.000426983 m/pix	Projections:	312056
Coverage area:	5.02959e-007 sq km	Error:	0.34527 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 1100D (18 mm)	2256 x 1504	18 mm	10.1189 x 10.1189 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

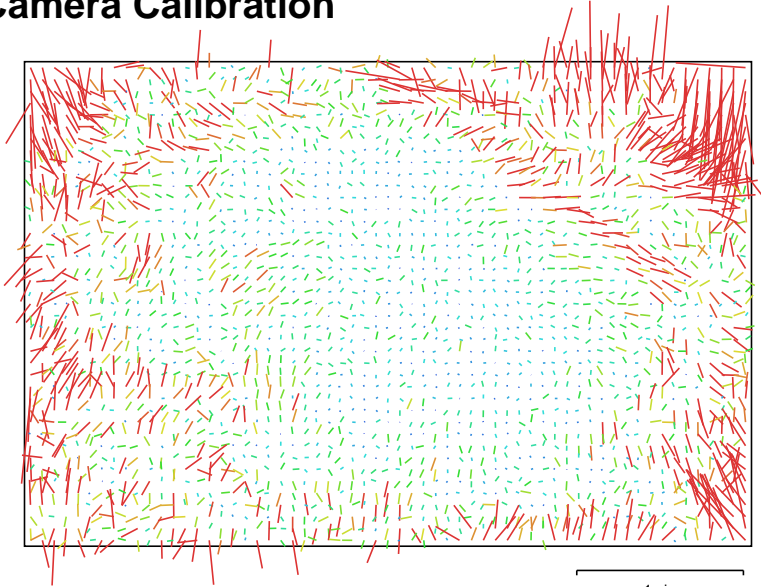


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 1100D (18 mm).

Canon EOS 1100D (18 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.179788
Fx:	1900.03	K2:	0.181212
Fy:	1905.52	K3:	-0.0572294
Cx:	1135.73	K4:	0
Cy:	777.867	P1:	0.00147882
Skew:	0.0220408	P2:	0.000217793

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
8	-0.000693	-0.000479	0.000086	0.000847	10	0.502510
10	0.000512	-0.000235	-0.000243	0.000614	8	0.599176
P1	-0.000090	0.000512	-0.000078	0.000526	17	0.690783
P2	0.000121	0.000283	-0.000032	0.000309	16	0.498518
P3	0.000445	-0.000166	0.000014	0.000475	26	0.594415
P4	0.000118	0.000001	-0.000084	0.000145	29	0.431412
P5	-0.000525	0.000141	0.000014	0.000543	30	0.435221
P6	0.000110	-0.000058	0.000323	0.000346	29	0.583719
Total	0.000398	0.000291	0.000152	0.000516	165	0.537295

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

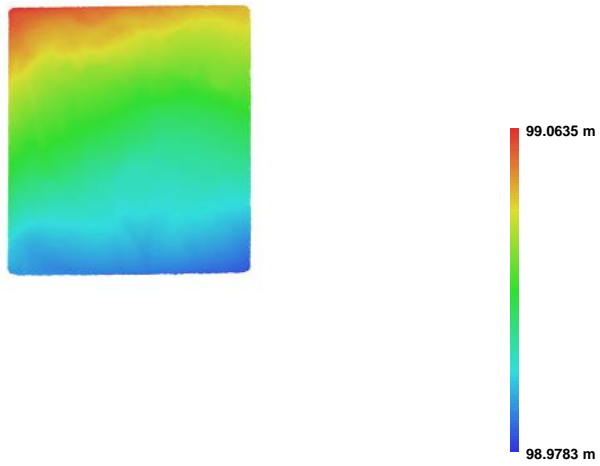


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000853965 m/pix
Point density: 1.37126e+006 points per sq m

Informe MDE5

Informe correspondiente a la obtención del modelo 5.

Agisoft PhotoScan

Processing Report
20 August 2015



Survey Data

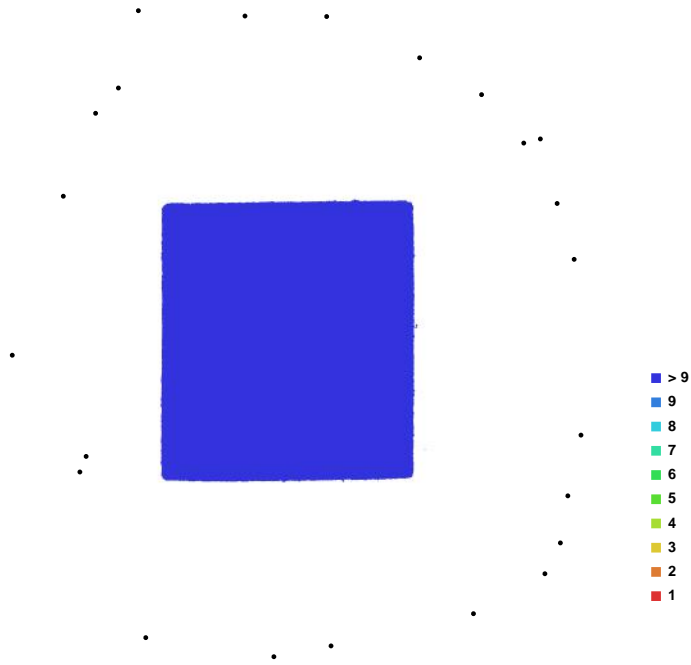


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	23	Camera stations:	23
Flying altitude:	1.4284 m	Tie-points:	74683
Ground resolution:	0.000436223 m/pix	Projections:	164961
Coverage area:	5.01295e-007 sq km	Error:	0.228357 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 1100D (18 mm)	2256 x 1504	18 mm	10.1189 x 10.1189 um	Yes

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

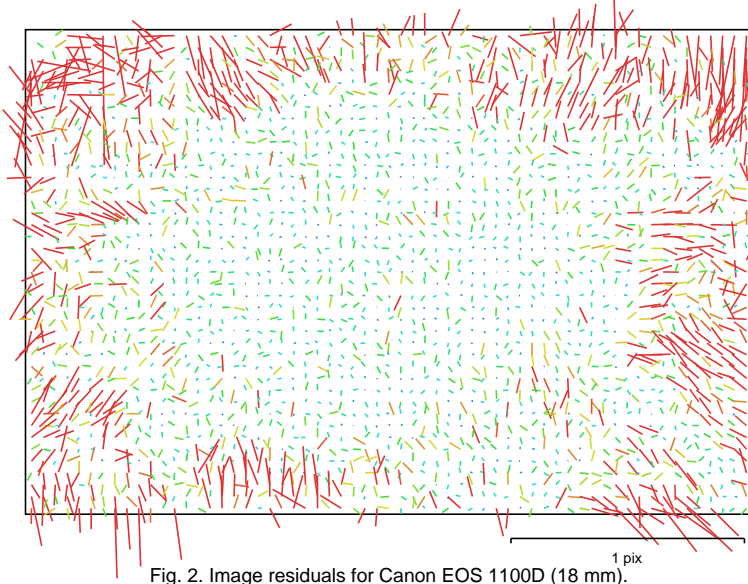


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 1100D (18 mm).

Canon EOS 1100D (18 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.17885
Fx:	1908.28	K2:	0.180661
Fy:	1907.77	K3:	-0.0377488
Cx:	1137.09	K4:	0
Cy:	766.285	P1:	0.00230713
Skew:	-1.25884	P2:	5.6429e-005

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
2	-0.000291	0.000477	0.000074	0.000564	6	0.217382
8	-0.001060	-0.000279	-0.000041	0.001097	4	0.598752
10	0.001310	-0.000115	-0.000048	0.001316	4	0.452589
P1	-0.000002	0.000008	-0.000002	0.000008	11	0.583154
P2	-0.000013	-0.000014	0.000004	0.000019	10	0.326244
P3	-0.000007	-0.000011	-0.000000	0.000012	23	0.638363
P4	-0.000013	0.000005	0.000006	0.000016	23	0.501098
P5	0.000010	-0.000004	0.000001	0.000011	22	0.370272
P6	0.000022	-0.000008	0.000007	0.000025	23	0.402936
Total	0.000570	0.000188	0.000033	0.000601	126	0.481733

Digital Elevation Model

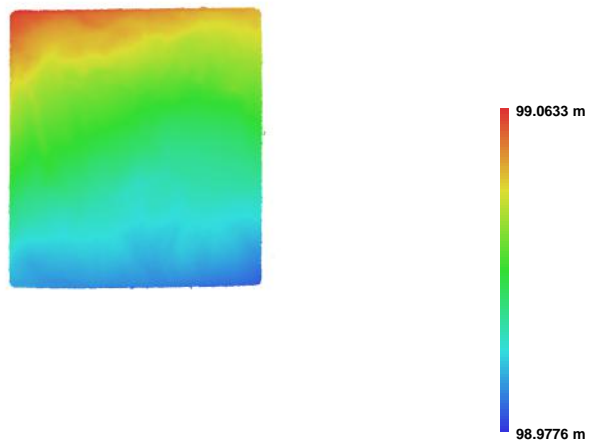


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.000872447 m/pix
Point density: 1.31378e+006 points per sq m

Anexo E

Imágenes

E.1 Modelos Digitales de Elevaciones

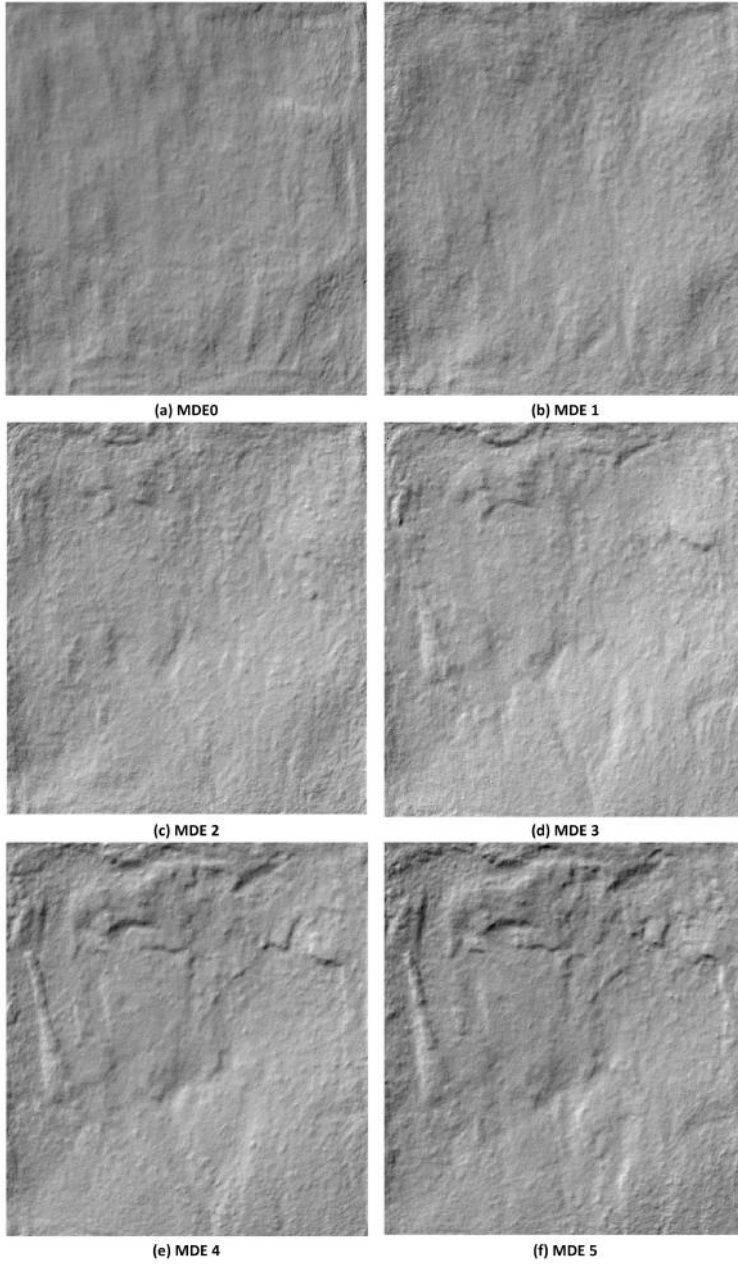
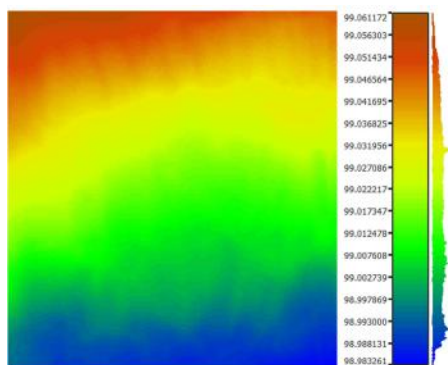
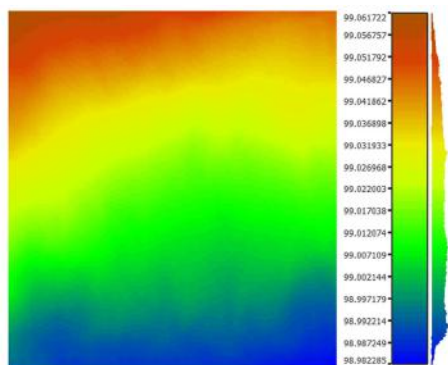


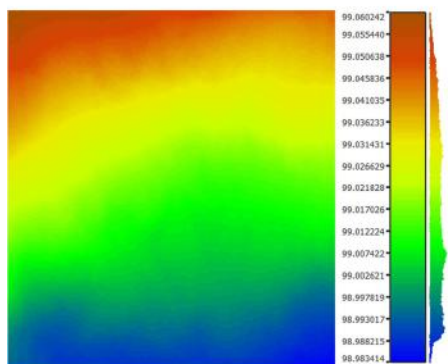
Figura E.1: MDE obtenidos a partir de imágenes: visualización con sombreado



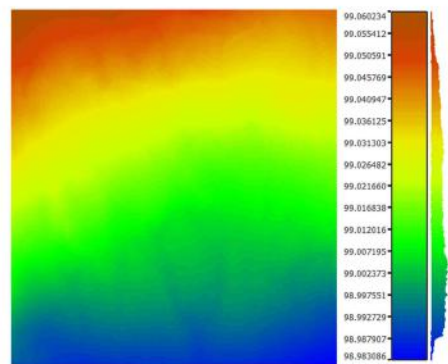
MDE Foto 0



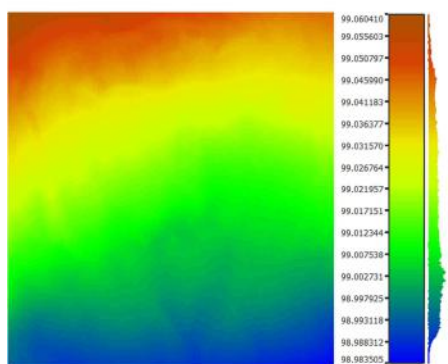
MDE Foto 1



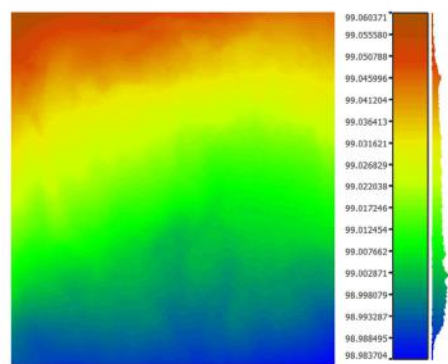
MDE Foto 2



MDE Foto 3



MDE Foto 4



MDE Foto 5

Figura E.2: MDE obtenidos a partir de imágenes (pixel 1 mm, elevaciones en metros)

E.2 Diferencias entre nubes de puntos láser y foto

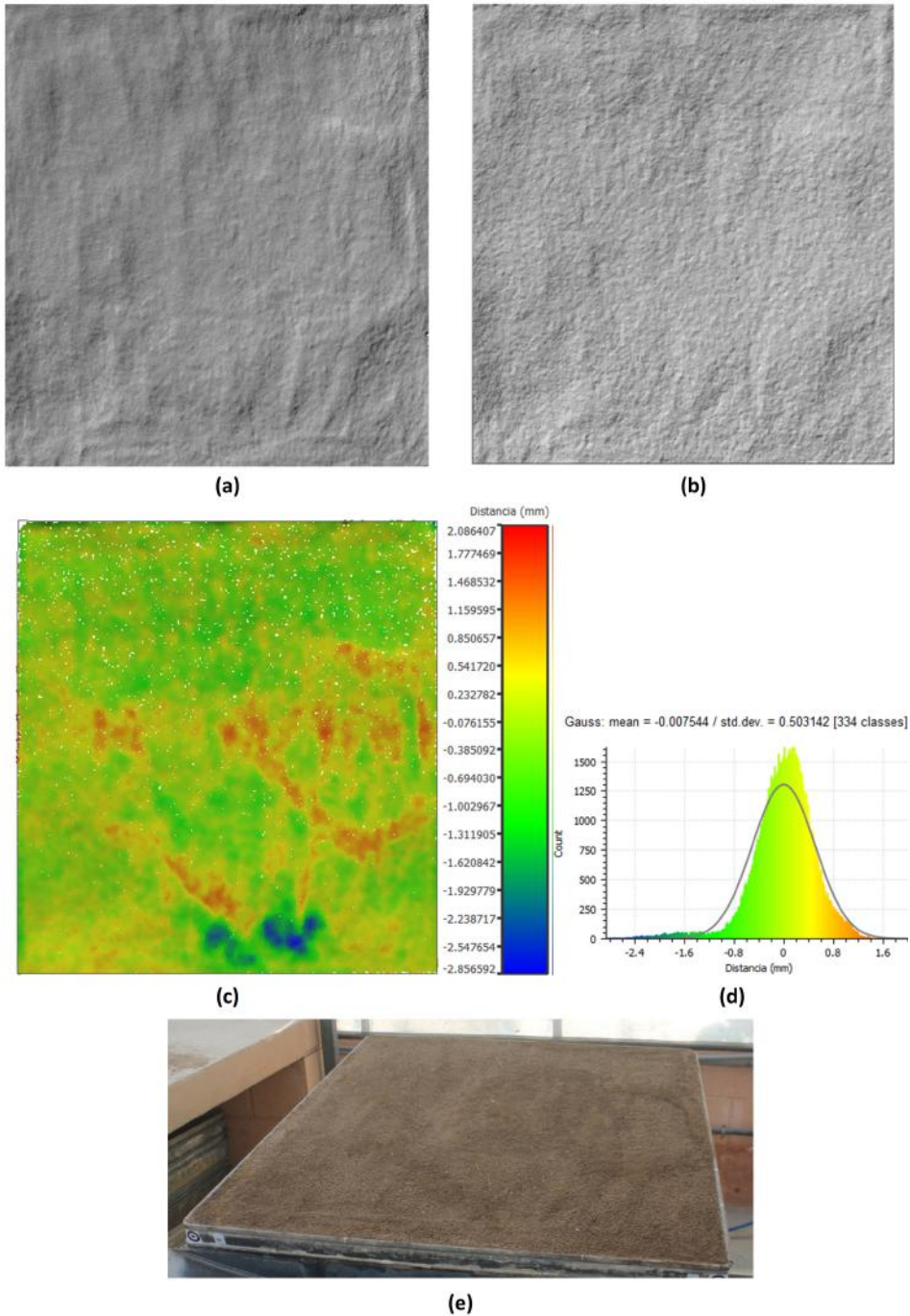


Figura E.3: (a): MDE foto 0 sombreado; (b): MDE láser 0 sombreado; (c) Diferencias (mm) entre las nubes de puntos láser0 y foto0; (d) Histograma correspondiente a las diferencias; (e) Imagen de la bandeja en el momento 0

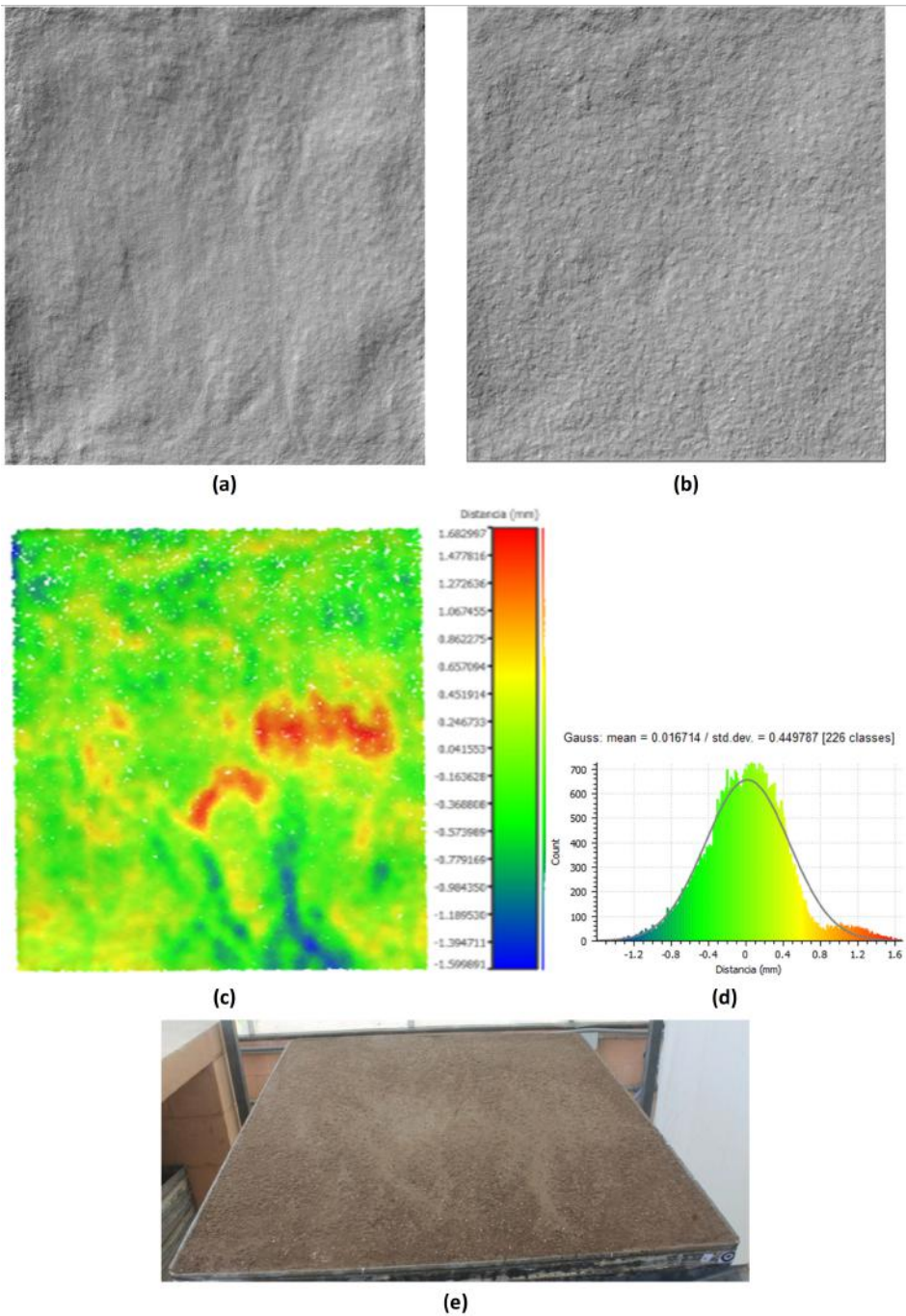


Figura E.4: (a): MDE foto 1 sombreado; (b): MDE láser 1 sombreado; (c) Diferencias (mm) entre las nubes de puntos láser1 y foto1; (d) Histograma correspondiente a las diferencias; (e) Imagen de la bandeja en el momento 1

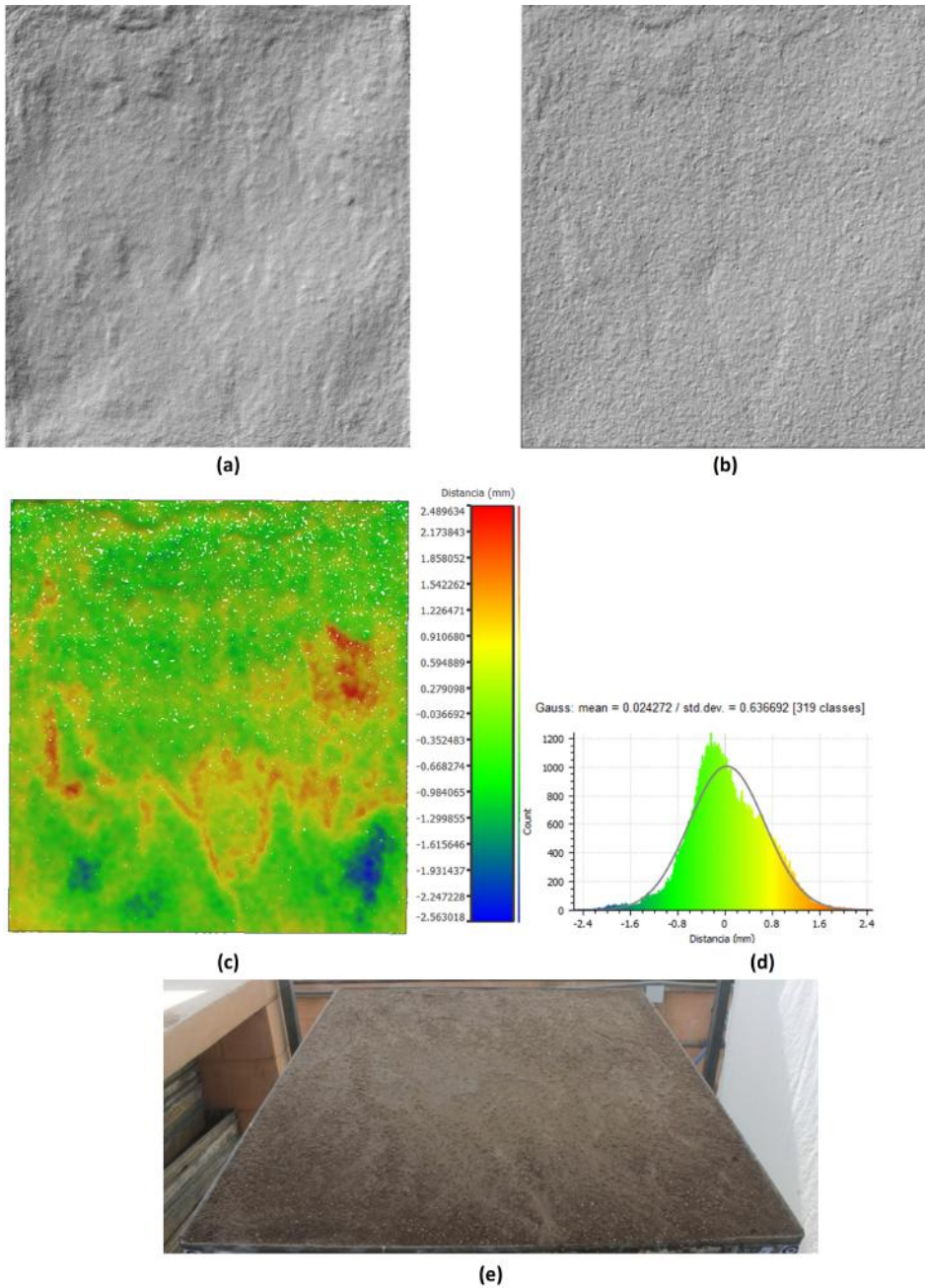


Figura E.5: (a): MDE foto 2 sombreado; (b): MDE láser 2 sombreado; (c) Diferencias (mm) entre las nubes de puntos láser2 y foto2; (d) Histograma correspondiente a las diferencias; (e) Imagen de la bandeja en el momento 2

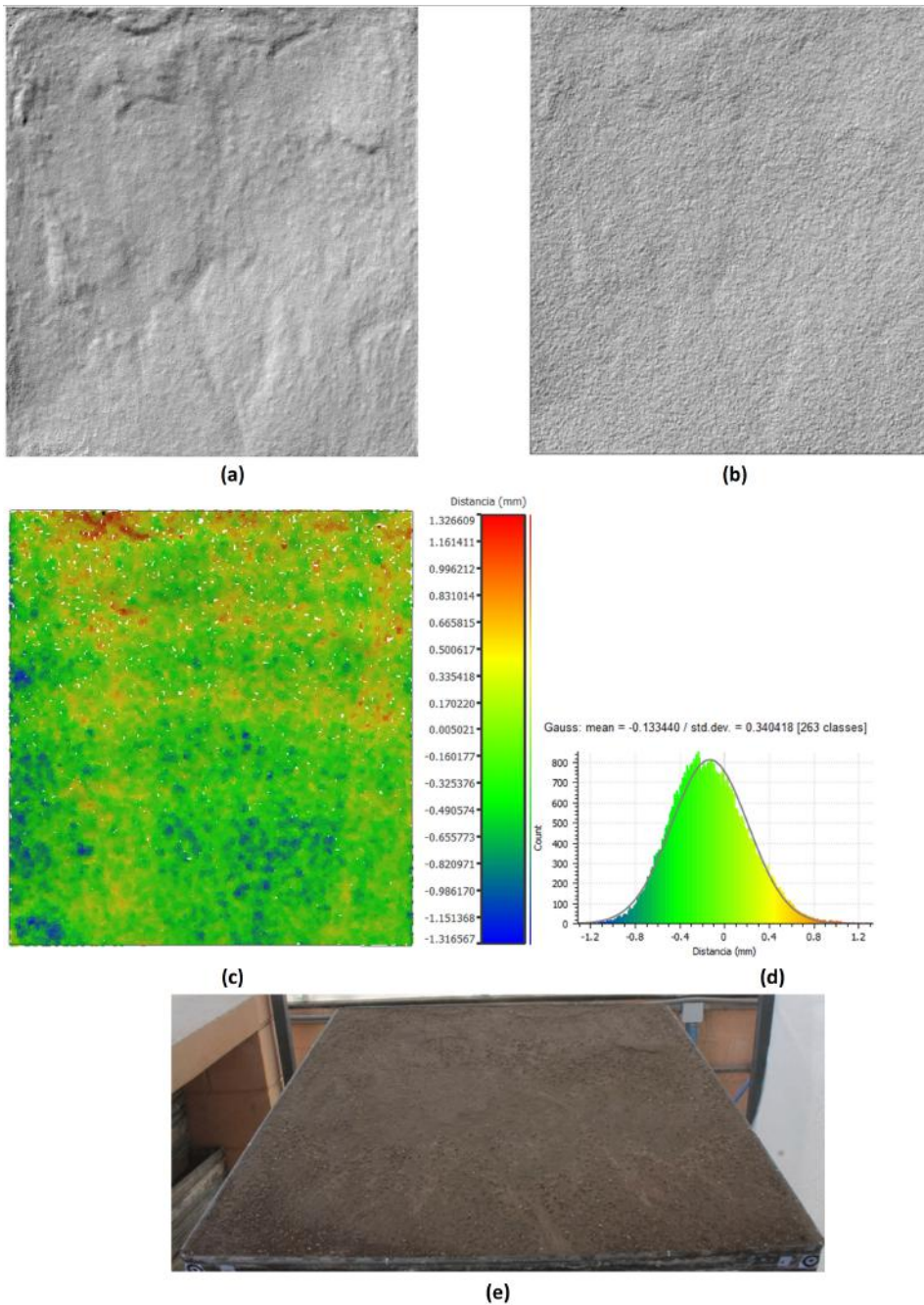


Figura E.6: (a): MDE foto 3 sombreado; (b): MDE láser 3 sombreado; (c) Diferencias (mm) entre las nubes de puntos láser3 y foto3; (d) Histograma correspondiente a las diferencias; (e) Imagen de la bandeja en el momento 3

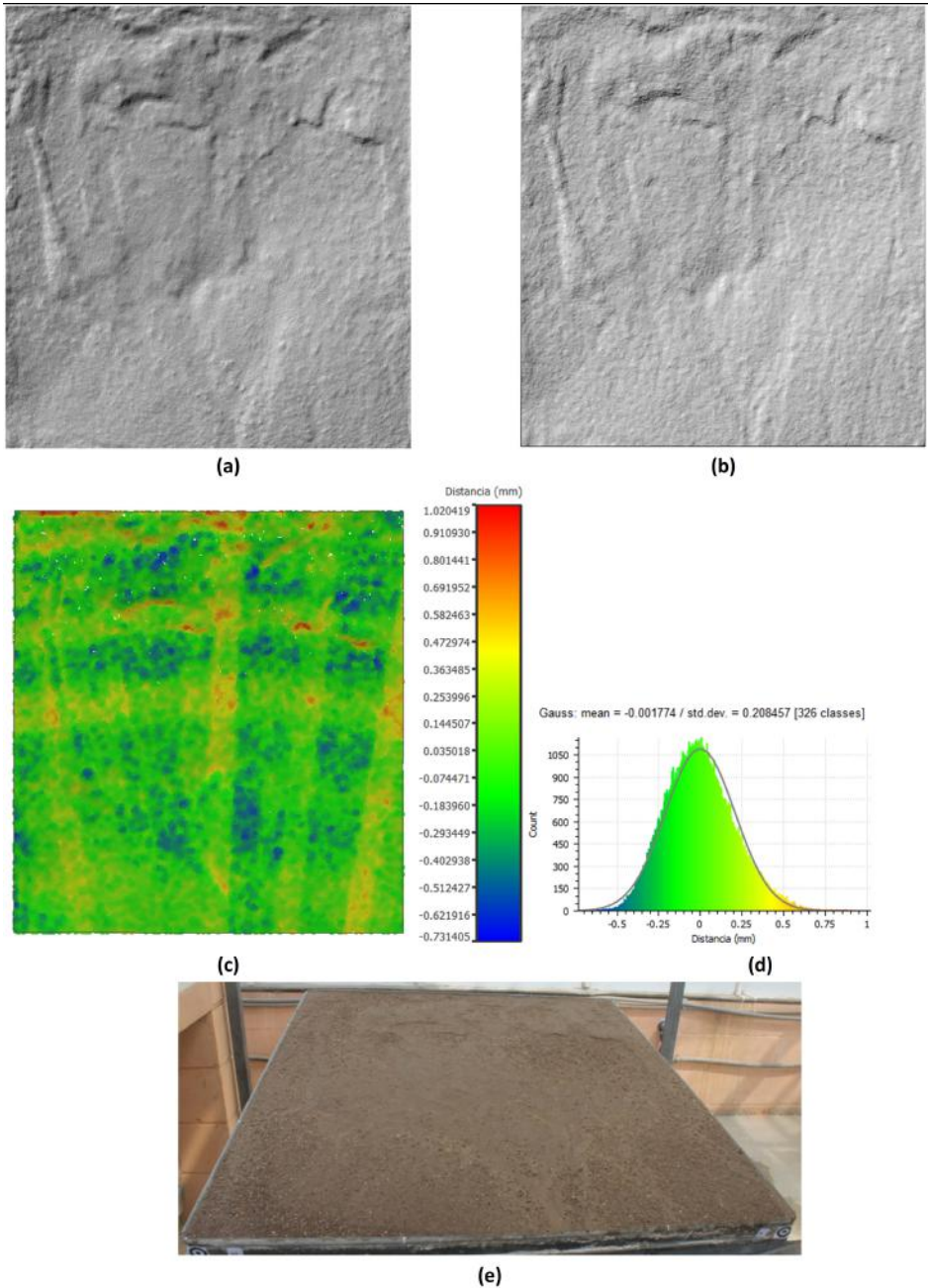


Figura E.7: (a): MDE foto 4 sombreado; (b): MDE láser 4 sombreado; (c) Diferencias (mm) entre las nubes de puntos láser4 y foto4; (d) Histograma correspondiente a las diferencias; (e) Imagen de la bandeja en el momento 4

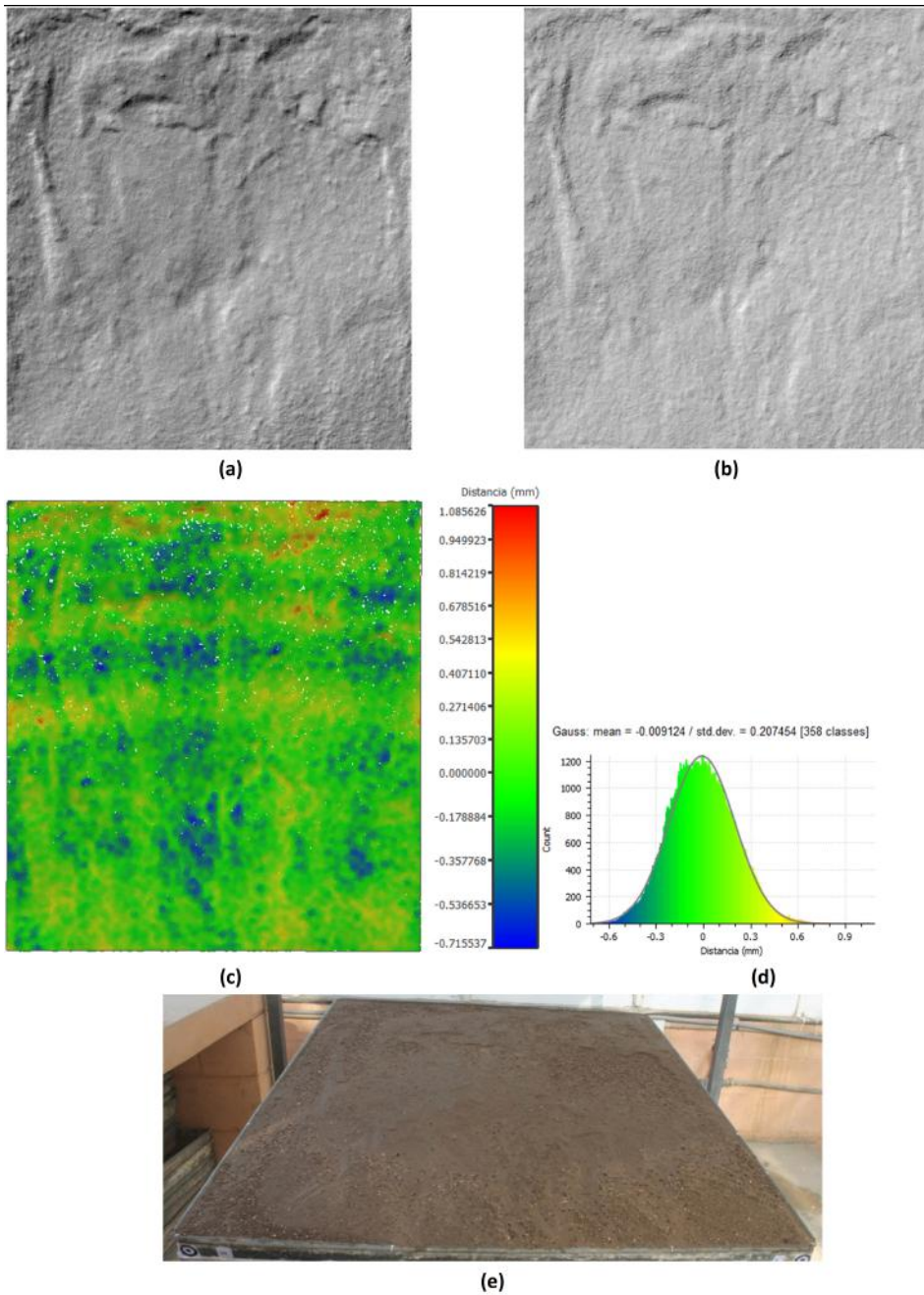


Figura E.8: (a): MDE foto 5 sombreado; (b): MDE láser 5 sombreado; (c) Diferencias (mm) entre las nubes de puntos láser5 y foto5; (d) Histograma correspondiente a las diferencias; (e) Imagen de la bandeja en el momento 5

E.3 Diferencias entre MDE

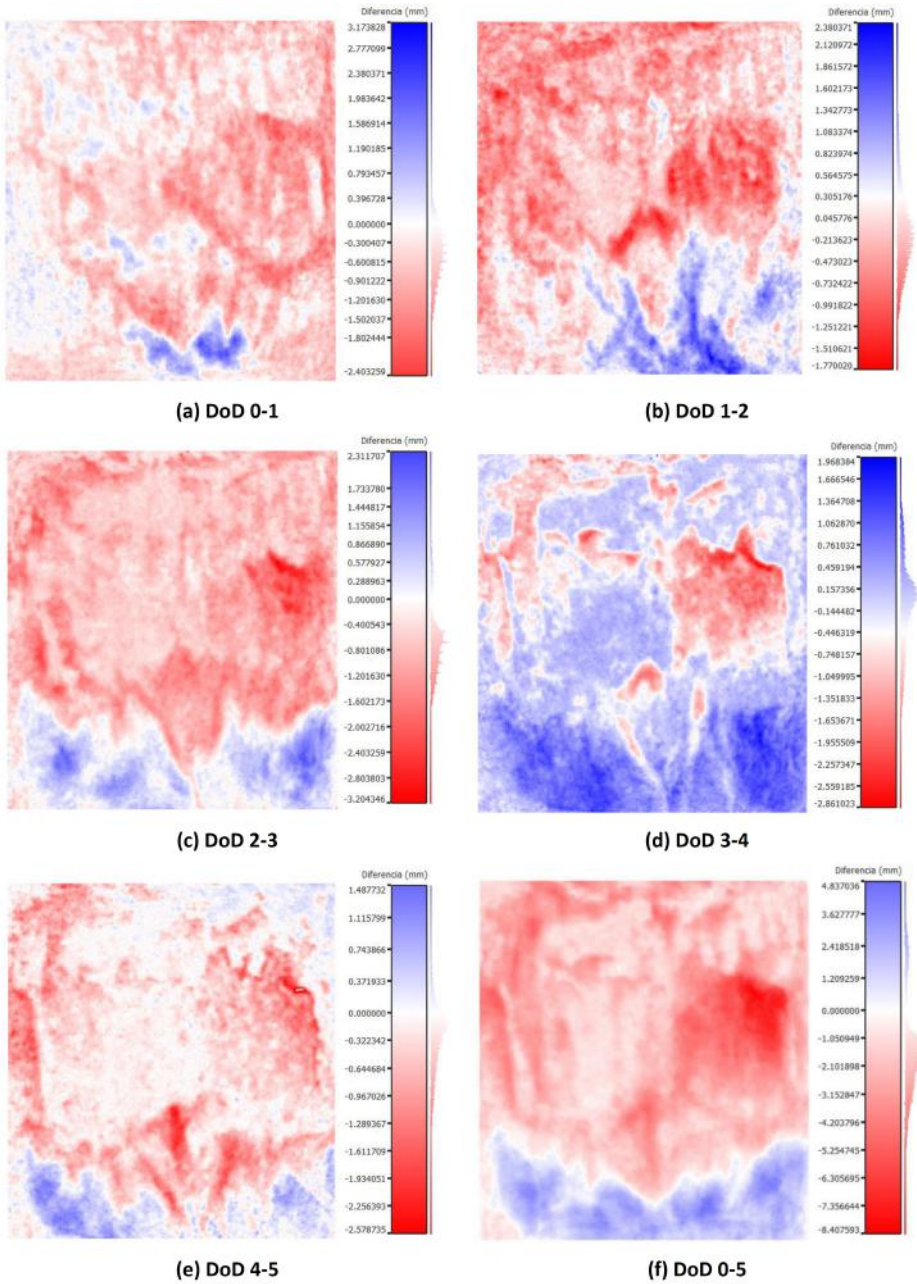


Figura E.9: DoD: Diferencias entre MDE (pixel 1 mm, diferencias en mm)

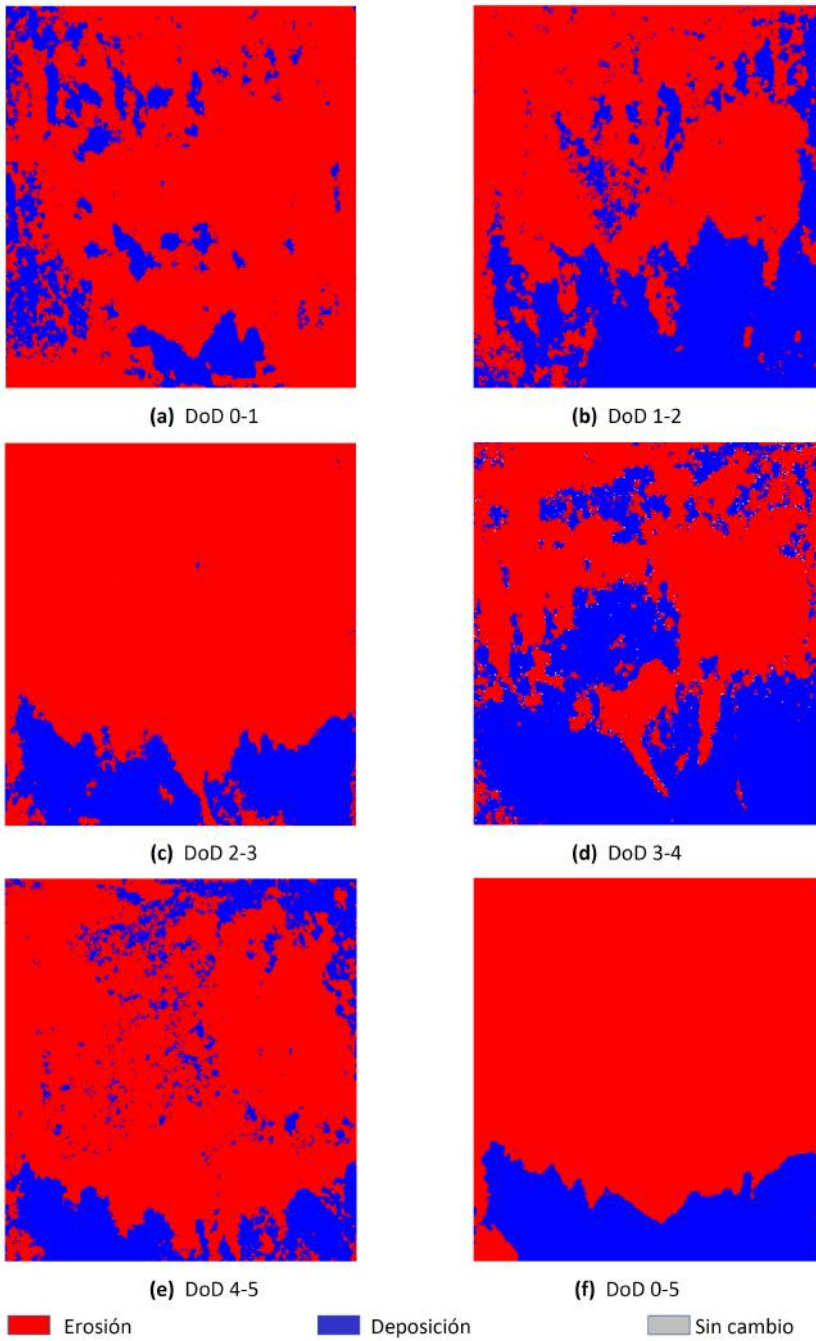


Figura E.10: Clasificación DoD sin umbral

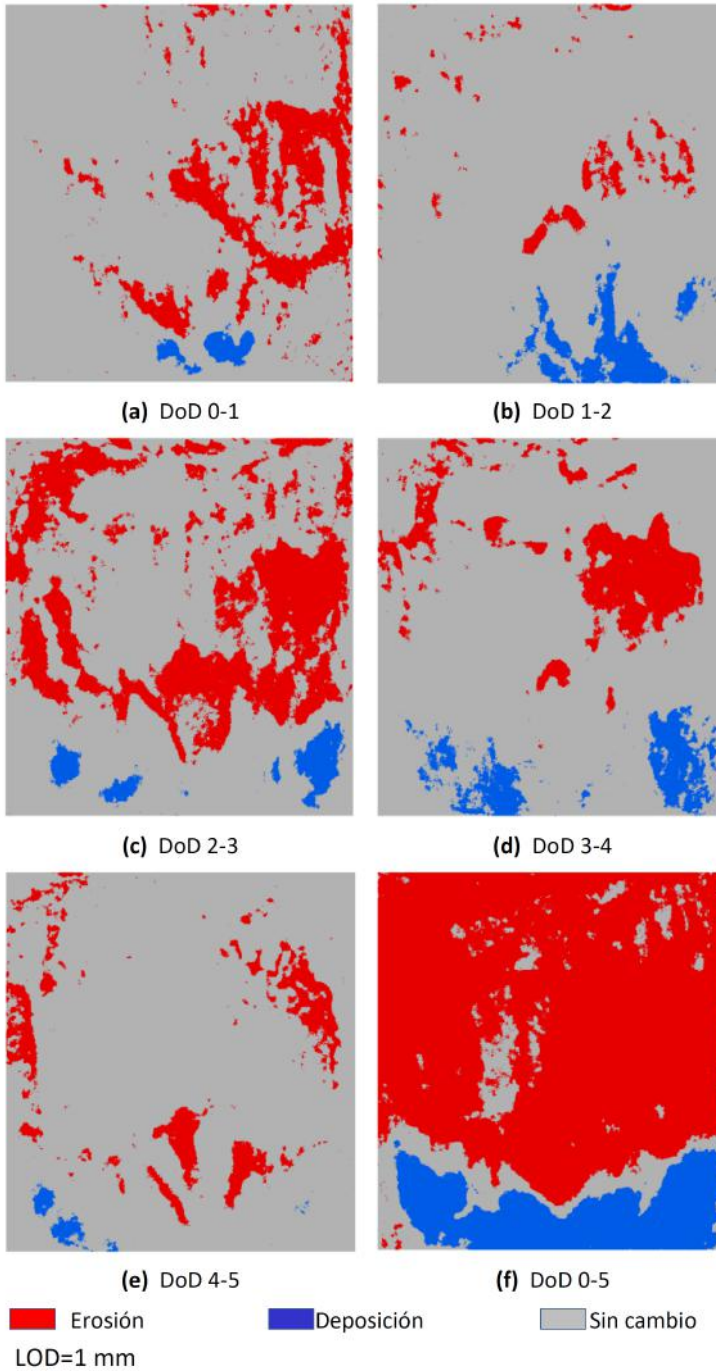


Figura E.11: Clasificación DoD con umbral 1 mm