



Elaboración de modelos 3D de diferentes morfologías y escalas utilizando técnicas Structure-from-Motion y fotografías terrestres

Production of 3D models for different morphologies and scales using Structure from Motion techniques and terrestrial pictures.

Gómez-Gutiérrez, Á.⁽¹⁾; Schnabel, S.⁽¹⁾; Conoscenti, C.⁽²⁾;
Caraballo-Arias, N.A.⁽³⁾; Ferro, V.⁽³⁾; Di Stefano, C.⁽³⁾; Sanjosé, J.J.⁽⁴⁾;
Angileri, S.E.⁽²⁾; De Matías, J.⁽⁴⁾; Berenguer-Sempere, F.⁽⁴⁾

(1) Grupo de Investigación Geoambiental, Universidad de Extremadura, Cáceres, España. alvgo@unex.es

(2) Department of Earth and Marine Sciences, University of Palermo, Palermo, Italy.

(3) Department of Agricultural and Forestry Sciences, University of Palermo, Palermo, Italy.

(4) Grupo de Investigación de Geomática, Universidad de Extremadura, España.

Resumen

En este trabajo se evalúan los métodos de foto-reconstrucción automatizada basados en el uso conjunto de las técnicas *Structure from Motion* (SfM) y *Multi-View Stereo* (MVS) para medir, monitorizar y cuantificar la dinámica de tres formas geomorfológicas: *i*) el glaciar rocoso del Corral del Veleta (Granada, España), *ii*) un paisaje de cárcavas de tipo *calanchi* (Sicilia, Italia) y *iii*) cinco pequeñas cabeceras de cárcava (Cáceres, España). Se incluyen en este trabajo los resultados sobre la precisión, utilidad y aplicabilidad de estas técnicas. Para la cuantificación de la precisión se utilizan el error cuadrático medio (RMSE) de los puntos de control que se emplean en la georreferenciación y las distancias medias absolutas entre cada nube de puntos y una nube de puntos de referencia calculadas con los métodos *cloud-to-cloud* y *multiscale model-to-model cloud comparison*. Para los casos *i*) y *iii*) las nubes de referencia se capturaron utilizando un escáner láser terrestre, mientras que para el caso *ii*) se empleó un modelo digital de elevaciones obtenido mediante fotogrametría clásica aplicada a fotogramas aéreos capturados con un vehículo aéreo no tripulado. Los resultados de estos análisis mostraron precisiones de rango centimétrico con distancias medias a los modelos de referencia que oscilaron entre 0,01 m y 0,42 m. Las precisiones estimadas indican que los modelos obtenidos podrían utilizarse para calcular el volumen de cambio geomorfológico, tan sólo en el caso de las cabeceras. En el caso del glaciar y del *calanchi* los modelos podrían emplearse para elaborar cartografía precisa o estimar parámetros morfológicos, pero no para registrar cambios a escala anual.

Palabras clave: Foto-reconstrucción 3D; tasa de precisión relativa; escáner láser terrestre; nube de puntos.



Abstract

Three-dimensional photo-reconstruction methods based on the use of Structure-from-Motion (SfM) and MultiView-Stereo techniques (MVS) are tested together for measuring, monitoring and quantifying three different geomorphological features: *i*) the Corral del Veleta rock glacier (Granada, Spain), *ii*) *calanchi* type badlands (Sicily, Italy) and *iii*) five small gully headcuts (Cáceres, Spain). Results about the accuracy, usefulness and applicability of these techniques are presented here. In order to quantify the accuracy, the root mean square error of the control points used during the georeferencing procedure and the average absolute distance between each point cloud and a benchmark cloud, calculated with the cloud-to-cloud and the multi-scale model-to-model comparison techniques, were used. For the cases *i*) and *iii*) the benchmark point clouds were acquired by means of a terrestrial laser scanner, while for the case *ii*) a digital elevation model obtained by means of classical photogrammetry applied to aerial pictures taken by an unmanned aerial vehicle was used as benchmark. The results of these analyses showed centimetre-level accuracies with average distances to the benchmark models ranging from 0.01 m to 0.42 m. The estimated accuracies show that models are suitable for estimating geomorphic changes only in the case of gully headcuts. In the case of the glacier and the badlands, the obtained models are not suitable to estimate changes at an annual scale, but could be useful to produce high-quality maps or estimating morphometric parameters.

Key words: 3D Photo-reconstruction; relative precision ratio; terrestrial laser scanner; point clouds.

1. Introducción

Durante los últimos años se han producido numerosos avances en el campo de la visión artificial que han permitido la obtención de modelos tridimensionales del terreno de elevada resolución a partir de las denominadas técnicas de foto-reconstrucción 3D (Eltner et al., 2015). Estos modelos, son originariamente nubes de puntos que representan los elementos que aparecen en la imagen y que posteriormente se transforman en superficies tipo Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Dentro de estos avances, la utilización conjunta de una técnica pre-existente, como la denominada *Structure-from-Motion* (SfM: Ullman, 1979) y recientes algoritmos como el *MultiView-Stereo* (MVS: Seitz et al., 2006) que permiten la densificación de las nubes de puntos resultantes, ha supuesto un hito en los métodos de captura de datos topográficos. Las ventajas sobre otros métodos de captura habituales han sido destacadas por numerosos autores y pueden resumirse en: *i*) no necesitan un alto grado de conocimiento y especialización ya que el procesamiento es prácticamente automático, *ii*) el tiempo de captura en campo es menor, *iii*) con el plan-

teamiento metodológico adecuado, las precisiones son similares a las obtenidas por los métodos más precisos disponibles hoy día y, finalmente, *iv*) requieren muy pocos recursos ya que con una cámara convencional y un ordenador es suficiente.

A nivel internacional, dentro del ámbito de las Ciencias de la Tierra, las técnicas de foto-reconstrucción 3D se han empleado para modelizar superficies de diferente naturaleza y magnitud (James y Robson, 2012; Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Javernick et al., 2014; Lucieer et al., 2014a; Frankl et al., 2015; Smith y Vericat, 2015; Stumpf et al., 2015). Las previsiones de los trabajos que se han publicado durante los últimos 5 años son claras y unánimes en cuanto a que tendrá lugar una utilización y expansión generalizada de estas técnicas en disciplinas como la Geomorfología. Existen algunas tecnologías concurrentes que sin duda, han generado sinergias en dicho crecimiento, como el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (conocidos como UAV, del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*) que permiten capturar fotografías aéreas de gran calidad y muy cerca de la superficie. En el campo de la Geomorfología, algunos ejem-

plos de este uso concurrente son los trabajos de Niethammer et al. (2012), Hugenholtz et al. (2013), Lucieer et al. (2014b) y Turner et al. (2015). Como muestra de la proliferación de las técnicas de foto-reconstrucción, decir que recientemente ha visto la luz un trabajo que aborda el estado del arte en el ámbito de la Geomorfometría. En esta publicación, se presentan un importante número de aplicaciones recientes y se incluyen algunos aspectos metodológicos relevantes. Como dato significativo, mencionar que en 2012 se publicaron 7 trabajos en revistas internacionales utilizando estas técnicas en el ámbito de las Ciencias de la Tierra, 6 en 2013, 24 en 2014 y otros 24 artículos hasta septiembre de 2015 (Eltner et al., 2015). Bien es cierto, que hasta ahora, la mayor parte de estudios llevados a cabo coinciden en que es necesario desarrollar un mayor número de trabajos aplicados, con el objetivo de analizar las prestaciones de estas técnicas bajo diferentes condiciones y en un amplio rango de formas del relieve, procesos, escalas y ambientes.

En España su aplicación ha sido mucho más limitada. Los estudios más relevantes han dado lugar a modelos 3D de alta resolución de cárcavas (Castillo et al., 2012; Gómez-Gutiérrez et al., 2014b), badlands (Nadal-Romero et al., 2015; Smith y Vericat, 2015) y glaciares (Gómez-Gutiérrez et al., 2014a; Gómez-Gutiérrez et al., 2015). Es decir, se han centrado en formas ciertamente dinámicas.

Los trabajos mostrando parámetros de precisión de estas técnicas a diferentes escalas son escasos. El trabajo pionero de James y Robson (2012) trató de normalizar los datos de precisión para diferentes elementos a diferentes escalas y posteriormente, Smith y Vericat (2015) abordaron los límites de aplicabilidad de estas técnicas al análisis y cuantificación de cambios en la superficie en función de la distancia de observación. Recientemente, Eltner y Schneider (2015) han analizado la precisión de diferentes planteamientos metodológicos (diferentes cámaras y software) sobre modelos obtenidos a partir de fotografías verticales y con una geometría de la toma no-convergente.

Este trabajo se enmarca en la línea de arrojar luz en cuanto a las prestaciones de este tipo de técnicas en diferentes morfologías, planteamientos metodológicos y condiciones. El objetivo principal es mostrar la aplicación de las técnicas de foto-reconstrucción automatizada en tres ambientes muy diferentes con los pormenores metodológicos de cada caso y examinar la precisión obtenida en cada uno de ellos. Se analizan, por tanto, diferentes estrategias de captura de fotogramas, procesamiento, parámetros para el análisis de la precisión y escalas. Adicionalmente, las precisiones obtenidas se ponen en contexto con las magnitudes de los cambios que experimentan cada una de las superficies analizadas y con los valores arrojados por otros autores en la literatura.

2. Metodología y estudio de casos

A continuación se presentan las características generales de cada una de las zonas en las que se llevó a cabo la aplicación de la foto-reconstrucción 3D (Figura 1) y se explican las especificidades del procedimiento metodológico adoptado en cada caso (Tabla 1).

2.1. Glaciar rocoso del Corral del Veleta

Se trata del glaciar más meridional de Europa, por este motivo, su monitorización presenta un gran interés científico ya que la dinámica del mismo se entiende como un indicador clave sobre los efectos del calentamiento global en la región mediterránea. Durante los últimos años se han desarrollado diversos trabajos sobre el glaciar y un análisis más profundo de las características del área de estudio, así como de los materiales y métodos empleados pueden encontrarse en Gómez-Gutiérrez et al. (2014a y 2015). El análisis de la calidad de los modelos obtenidos mediante foto-reconstrucción 3D habitualmente se realiza usando un modelo más preciso y evaluando la distancia entre ambos. En este caso, para obtener el modelo de referencia se empleó un dispositivo TLS *C10 Scanstation* de *Leica* con el que

Tabla 1: Características de los planteamientos metodológicos desarrollados en cada uno de los tres casos de estudio y donde se incluyen además los valores del Error Cuadrático Medio (RMSE) obtenido durante la georreferenciación del modelo, la exactitud o distancia media al modelo de referencia calculada con la técnica *Cloud-to-Cloud* (C2C; Girardeau-Montaut et al., 2005) y con el método *Multiscale Model-to-Model* (M3C2; Lague et al., 2013) y el *Relative Precision Ratio* (RPR) o Ratio de Precisión Relativa. Los datos pueden hacer referencia a los modelos obtenidos con la implementación propia del algoritmo *Scale-Invariant Feature Transform* (SA) con el software 123D Catch (C) o con *Agisoft Photoscan* (AP). MDE= Modelo Digital de Elevaciones y DoDs=Modelos Digitales de diferencia (*DEMs of Difference*).

Table 1: Characteristics of the approaches carried out in each study case where the following parameters are included: the Root Mean Square Error (RMSE) obtained during the georeferencing procedure, the accuracy or distance from each model to the benchmark model estimated with the Cloud-to-Cloud (C2C; Girardeau-Montaut et al., 2005) technique, with the Multiscale Model-to-Model (M3C2; Lague et al., 2013) and the Relative Precision Rate (RPR). Figures may refer to the models obtained by means of the application of the Scale-Invariant Feature Transform algorithm (SA), or obtained with the software 123D Catch (C) or with Agisoft Photoscan (AP). MDE=Digital Elevation Model and DoD= Digital Elevation Model of Difference.

	Glaciar rocos del Veleta (Granada, España)	<i>Calanchi</i> (Sicilia, Italia)	Cabeceras de cárcava (Cáceres, España)
Formas (n)	1	1	5
Modelo de referencia	TLS	MDE-UAV (píxel 0,03 m)	TLS
Distancia media de observación (m)	300	20-100	10
Cámara y número de fotos	Canon EOS 5D, 9	Canon 550D, 64	Canon 550D, 64
Software/algoritmo	Desarrollo propio (SA) 123D Catch (C) Agisoft Photoscan (AP)	Agisoft Photoscan (AP) 123D Catch (C)	123D Catch
RMSE (m)	0,03 (C)	0,11 (AP) 0,18 (C)	0,00-0,07 (C)
Distancia C2C	0,28(SA) 0,21(C) 0,12(AP)	0,20 (AP) 0,42 (C)	0,01-0,02 (C)
Distancia M3C2	0,08 (AP)	-	-
Densidad (ptos·m ⁻²)	8,1 (SA) 20,6(C) 98,2(AP)	154 (C) 545 (AP)	13.130 (C)
RPR	1071 (SA) 1.429 (C)	100-500 (AP) 48 (CA)	372-1.167
Productos derivados	Nubes, MDE y Ortofotografías	Nubes, MDE y Ortofotografías	Nubes, MDE y DoDs

se realizaron 4 estacionamientos y escaneos del glaciar tratando de minimizar los ocultamientos. Las 4 tomas fueron fusionadas en una única nube de puntos mediante puntos homólogos de enlace utilizando el software *Cyclone*. Durante dicho proceso, los errores de registro estuvieron siempre por debajo de 0,003 m.

Respecto a las fotografías, éstas se capturaron desde lo alto del Pico Veleta (Figura 2-1),

a unos 300 m de elevación sobre la depresión en la que localiza el glaciar. El número reducido de fotografías empleadas (n=9) así como la geometría no convergente de la toma vienen determinados por el relieve. Para su captura se utilizó una cámara Canon EOS 5D con una distancia focal fija de 100 mm y una exposición de 1/160 s. Las fotografías se utilizaron como entrada en tres flujos de trabajo diferente. El primero consistió en la implementación propia del algoritmo *Scale-Invariant Fea-*

ture Transform (SIFT; Lowe, 2004) y la geometría epipolar que necesita como entrada las fotografías oblicuas y los parámetros de calibración de la cámara para producir la nube de puntos resultante: método semi-automático (de aquí en adelante SA). Una profunda exposición de esta metodología puede encontrarse en De Matías-Bejarano et al. (2009). El segundo y tercer flujo de trabajo consistieron en la utilización del software gratuito *123D Catch* (AUTODESK) y el software comercial *Agisoft Photoscan* (AGISOFT LLC) que utilizan como entrada las imágenes oblicuas sin necesidad de parámetros de calibración, si bien, el modelo resultante de ambos procesos necesita ser escalado y/o georreferenciado. Para este procedimiento se emplearon puntos de control ($n=10$) localizados en el modelo generado con el TLS y un modelo de transformación clásico y rígido en el entorno del software *CloudCompare*. A estos dos flujos de trabajos nos referiremos en adelante como Casi Automáticos (denotando con C a los resultados del software *123D Catch* y con AP a los resultados del software *Agisoft Photoscan*).

La evaluación de la calidad de los modelos resultantes se llevó a cabo mediante cuatro parámetros diferentes. El primero de ellos es el Error Cuadrático Medio (RMSE) obtenido durante el proceso de georreferenciación y que aporta información sobre la calidad de la estructura global del modelo. Sin embargo, si se desea una estimación más precisa de la calidad de los puntos que se incluyen en el modelo es necesario implementar métodos que analicen las distancias entre el modelo obtenido y otro de referencia (adquirido con el TLS) de una forma más intensiva (punto a punto). Entre este tipo de parámetros se seleccionaron el método Cloud-to-Cloud (C2C) de Girardeau-Montaut et al. (2005) implementado en el software *CloudCompare* que aporta la distancia media entre los puntos en la nube obtenida y sus vecinos más próximos en la nube de referencia. Recientemente, algunos investigadores han propuesto alternativas a la técnica C2C para la estimación de distancias reales en un entorno tridimensional de nubes de puntos. Entre estas alternativas,

la propuesta de Lague et al. (2013) denominada *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2) parece presentar la opción más adecuada (Lague et al., 2013). En el presente trabajo, el M3C2 tan sólo se calculó para los modelos más recientes del glaciar, si bien, Gómez-Gutiérrez et al. (2015) han mostrado la existencia de una clara correlación entre el C2C y el M3C2 para la zona de estudio ($R=0.90$ y $p<0.01$). Finalmente, y con el fin de permitir la comparación entre modelos obtenidos con fotografías tomadas a diferentes distancias se utilizó el “*survey range*” o “*Relative Precision Ratio*” (RPR; James y Robson, 2012) que trata de normalizar un valor de precisión (puede ser el RMSE, el C2C o el M3C2) utilizando la distancia media de captura de las fotografías.

El empleo de varios parámetros para describir la calidad del modelo resulta en una mejor comprensión global de la misma. El RMSE, por ejemplo, suele estar basado en unos pocos puntos de control y, en ocasiones, estos puntos son introducidos artificialmente en el área de estudio (como dianas, por ejemplo). Debemos tener en cuenta, que la geometría, textura y contraste de estos puntos de control artificiales difiere bastante de los puntos naturales que contiene la nube y que los algoritmos SfM basan su funcionamiento en identificar elementos en base a su textura e iluminación. Por este motivo, el RMSE obtenido a partir de puntos de control artificiales puede no ser un buen indicador de la calidad de los puntos naturales de la superficie representada (Gómez-Gutiérrez et al. 2015). Por otra parte, la utilización de parámetros estimados en ambientes 3D es totalmente recomendable frente a aproximaciones basadas en MDE interpolados y procesados en ambientes 2.5D (Sistemas de Información Geográfica).

2.2. *Calanchi en Sicilia*

En segundo lugar, se llevó a cabo la foto-reconstrucción de un *calanchi* en Sicilia (Italia; Figura 1). Los *calanchi* son cárcavas complejas, con escasa vegetación y elevada pendiente que presentan aristas divisorias muy



Figura 1: localización de las tres áreas de estudio (Arriba); debajo: (1) vista del frente del glaciér rocoso y del circo del Corral del Veleta, (2) vista general del badland *calanchi* y (3) detalle de una de las cárcavas en Parapuños.

Figure 1: location of the three study areas (above); below: (1) front of the Corral del Veleta rock glacier and Cirque, (2) general view of the *calanchi* badlands and (3) detail of one headcut in Parapuños gully.

marcadas y angulosas y procesos de erosión acelerada (Caraballo-Arias et al., 2014). Se trata de una forma muy dinámica que supone un reto para este tipo de estudios. La captura de las fotografías se llevó a cabo desde zonas próximas al *calanchi* con una cámara Canon EOS 550D (Figura 2-2), permitiendo una distancia focal y exposición variables. La geometría de la toma (Figura 2-2) trató de estructurar las posiciones de la cámara a partir de un planteamiento convergente y rodeando al *calanchi*. Sin embargo, lo escarpado del terreno dificultó la obtención de una geometría claramente convergente. La foto-reconstrucción se llevó a cabo utilizando los dos programas que anteriormente hemos denominado casi automáticos: C y AP. Para el escalado y georreferenciado de las nubes de puntos resultantes de ambos programas se utilizó, de nuevo, una transformación rígida clásica en el software *CloudCompare* a partir de puntos de control naturales ($n=20$) detectados sobre

una ortofotografía y MDE obtenido a partir de fotogrametría tradicional con fotogramas capturados desde un UAV. Tanto el MDE como la ortofotografía del *calanchi* presentaron una resolución espacial suficiente a tal efecto con un tamaño de píxel en ambos casos de 3 cm. Primero, se llevó a cabo un ajuste manual y posteriormente un ajuste refinado (ICP: *Iterative Closest Point*) de las nubes de puntos obtenidas con sendos programas (C y AP). El desarrollo de estos trabajos se efectuó con el software *CloudCompare*.

2.3. Cárcavas de cárcava permanente en Parapuños

Finalmente, se monitorizaron 5 pequeñas cárcavas de una cárcava permanente de fondo de valle localizada en una cuenca adhesionada del SO de España (Figura 1). Una exposición más profunda de los diferentes aspectos de

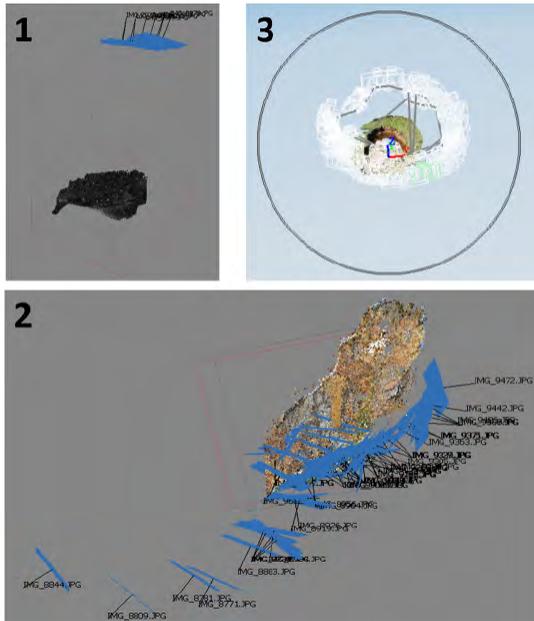


Figura 2: localización de la cámara en cada fotografía para el glaciar (1), el calanchi (2) y una de las cabeceras de la cárcava (3).

Figure 2: camera location for each picture in the glacier (1), the calanchi (2) and one of the gully headcuts (3).

este trabajo puede encontrarse en Gómez-Gutiérrez et al. (2014b). La monitorización se llevó a cabo inicialmente con el objetivo de realizar una cuantificación de la dinámica erosiva del canal, tomando fotografías durante tres momentos diferentes de un breve período de tiempo (54 días). De forma adicional, durante una de las campañas de campo se registraron datos mediante un TLS (*Scanstation C10* de *Leica*), además de las fotografías adquiridas con una cámara Canon EOS 550D. La toma de las fotografías se realizó siguiendo un esquema convergente alrededor de cada cabecera (Figura 2-3). Para la captura de datos con el TLS se seleccionó una única estación por cabecera, situándose el instrumento en la salida de la cabecera aguas abajo. Esta ubicación minimiza el ocultamiento y permite una rápida captura de datos. A partir de las imágenes se elaboraron modelos 3D utilizando el software C. Estos modelos fueron posteriormente escalados y georeferenciados siguiendo el mismo procedimiento descrito en

el apartado 2.1. Con los modelos obtenidos se elaboraron MDE de alta resolución para cada fecha en la que se tomaron fotografías y se estimaron los volúmenes de material erosionado y acumulado en cada cabecera. Se generaron modelos digitales de cambio geomorfológico conocidos como *DEMs of Difference* (DoD) que representan de forma espacial los cambios registrados en cota. Al mismo tiempo, se analizó la calidad de cada foto-reconstrucción comparando las distancias entre la nube de puntos obtenida y la registrada mediante el TLS durante uno de los muestreos. El procedimiento fue similar al previamente descrito en el apartado 2.1.

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta un resumen de los resultados para cada caso de estudio. El lector debe tener en cuenta la heterogeneidad de los planteamientos metodológicos a la hora de realizar un análisis. Pese a esta heterogeneidad, diversidad y complejidad, de dicha tabla puede extraerse que todos los planteamientos metodológicos desarrollados dieron lugar a nubes de puntos de gran calidad con distancias medias absolutas a los modelos de referencia (C2C) que oscilaron entre 0,01 m para las cabeceras de cárcava y los 0,28 m para el glaciar del Corral del Veleta foto-reconstruido con una implementación propia del algoritmo SIFT y la geometría epipolar. Bien es cierto que las distancias de observación en ambos casos difieren en orden de magnitud (10 m en el caso de las cabeceras y 300 m aproximadamente en el caso del glaciar). Para poder realizar comparaciones entre los diferentes casos se recomienda la utilización del RPR que muestra la ratio entre la precisión del modelo (que puede estar definida por el error cuadrático medio de georeferenciación o la distancia C2C o M3C2 a nubes o modelos de referencia) y la distancia media de captura de las fotografías. Es lógico que a mayores distancias de captura u observación se generen modelos 3D con mayores errores y por tanto el RPR trata de normalizar dicha distancia de observación. El RPR es un valor adimensional que muestra el cociente entre la exactitud de

la medición o distancia media al modelo referencia y la distancia de observación para el error unitario. Por ejemplo, en el caso del *calanchi* foto-reconstruido con AP se obtuvo un RPR entre 1:100-500, lo que significa que para obtener precisiones aproximadas de 1 m, la distancia de observación debería situarse en el intervalo 100-500 m. A mayor valor del denominador del RPR, más calidad tendrá el modelo ya que se obtendrá un error unitario a una mayor distancia.

La Figura 3 muestra la distribución espacial de las distancias de la nube de puntos obtenida mediante AP para el glaciar rocoso del Veleta al modelo de referencia registrado con el TLS. La estimación de dichas distancias se realizó mediante el método M3C2. Puede apreciarse que la mayor parte de los puntos en presentan distancias a la nube de referencia inferiores a ± 0.25 m (nótese que las fotografías que se emplearon para dicha foto-reconstrucción fueron tomadas a una distancia aproximada de 300 m) y que la geometría de la toma está altamente condicionada por el relieve (Figura 2-1). Los valores más elevados de distancias (en rojo en la Figura 3) se localizan en las con-

cavidades que generan los grandes bloques y que presentan menor visibilidad en los fotogramas mientras que los valores con distancias más alejadas pero signo negativo (en azul en la Figura 3) se dan en la parte superior del glaciar, que habitualmente está cubierta de nieve.

Por otra parte, el RPR, creemos que no alcanza a sintetizar completamente los elementos que determinan la precisión global de cada modelo. En los tres casos se encontraron menores densidades de puntos para las zonas en sombra, con menor iluminación o con texturas homogéneas (vegetación, nieve, etc.). Diversos autores han realizado propuestas para tratar de minimizar estas imprecisiones provocadas por las sombras o condiciones de textura e iluminación deficientes. Gómez-Gutiérrez et al. (2014a) propusieron la utilización de modelos de sombras simuladas para la determinación de la fecha y hora óptimas para la captura de las fotografías. Previamente, James y Robson (2012) habían recomendado la utilización de luz difusa, si bien, en determinadas localizaciones esto no siempre es posible. De forma alternativa, Gómez-Gutiérrez et al.

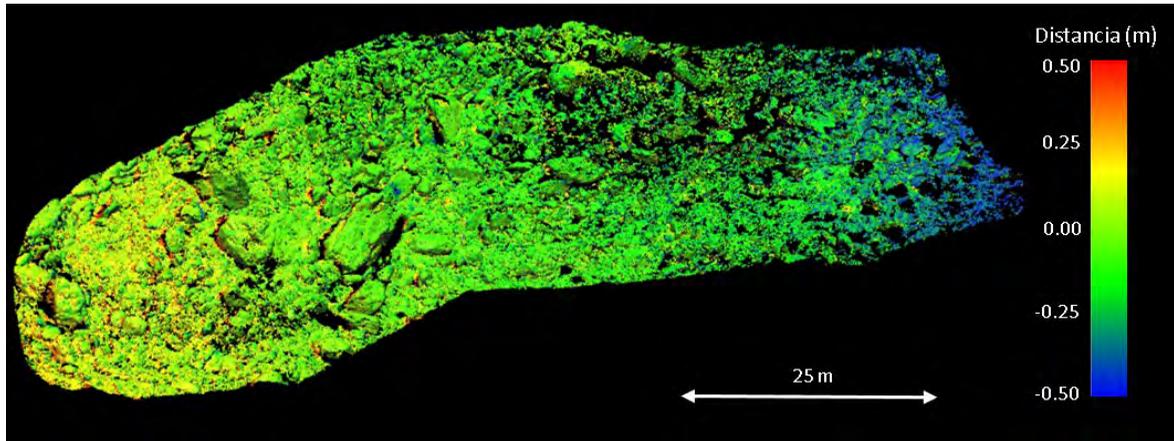


Figura 3: Vista tridimensional de la distribución espacial de las distancias entre la nube obtenida mediante el software *Agisoft Photoscan* y el modelo de referencia registrado con el escáner láser terrestre (TLS) para el glaciar rocoso del Corral del Veleta. Las distancias fueron calculadas utilizando la técnica *Multiscale Model-to-Model* (M3C2; Lague et al., 2013).

Figure 3: Three-dimensional view of the spatial distribution of the distances between the point cloud obtained with Agisoft Photoscan and the benchmark model acquired by means of the Terrestrial Laser Scanner (TLS) for the Corral del Veleta rock glacier. The estimation of the distances was based on the Multiscale Model-to-Model (M3C2; Lague et al., 2013) technique.

(2015) utilizaron técnicas que alteran el rango dinámico de los fotogramas usando fotografías capturadas con diferentes exposiciones y realizando composiciones de alto rango dinámico. Sin embargo, las conclusiones de este trabajo fueron que las mejoras obtenidas con las alteraciones del rango dinámico no resultaron significativas desde el punto de vista de la calidad geométrica de los modelos.

Resulta interesante que para el glaciar rocoso se obtuvieran buenos valores de RPR cuando las fotografías se capturaron utilizando una geometría no convergente (impuesta por el relieve), mientras que para el *calanchi* los valores de RPR fueron menores. En el caso de las cabeceras de cárcava, pese a presentar una mejor geometría de la toma (convergente), los valores de RPR fueron similares a los obtenidos en el glaciar. Los autores atribuimos las diferencias en los valores de RPR fundamentalmente a la textura de los elementos a foto-reconstruir: en el caso del glaciar se trata de bloques heterométricos y angulosos de micaesquistos feldespáticos que dan lugar a elementos claramente diferenciables para los algoritmos de correlación de imágenes. Por otro lado, las cabeceras pese a presentar una geometría convergente incorporan áreas con textura muy pobre: zonas vegetadas en las márgenes y el lecho. Respecto al *calanchi* presenta una cubierta de pasto seco en algunas zonas que también da lugar a superficies con texturas muy pobres. Al mismo tiempo, es prácticamente imposible tratar de preservar una geometría convergente de la toma cuando se aborda una forma tan compleja y abrupta. En un reciente trabajo, Smith y Vericat (2015) realizan una recopilación de los valores de RPR en la literatura, obteniendo un valor medio de 1:639, si bien, de nuevo, existe cierta heterogeneidad en los trabajos que han dado lugar a dicho valor. Los RPR obtenidos aquí, mejorarían el valor medio aportado por Smith y Vericat (2015) para el caso del glaciar y serían peores para el *calanchi*. En el caso de las cabeceras dependería de cada una en cuestión, ya que los valores de RPR oscilaron entre 1:372 y 1:1167.

Otro factor que podría contribuir a justificar las diferencias en los valores del RPR es la escala y las relaciones entre la superficie observada, la focal de la cámara y la distancia de observación. Smith y Vericat (2015) constataron que las fotografías oblicuas terrestres empleadas para realizar foto-reconstrucción pueden igualar, en términos de precisión, a los equipos TLS a escala de parcela, sin embargo, pierden eficiencia cuando se aplican sobre superficies de mayor tamaño y complejidad.

En lo referente al software, en el caso del glaciar se aplicaron SA, C y AP, mostrándose claramente más preciso este último con distancias C2C absolutas muy inferiores, 0,12 m frente a 0,28 (SA) y 0,21 (C). En el caso del *calanchi*, de nuevo AP obtuvo distancias C2C inferiores a C, con valores de 0,20 m y 0,42. Es decir, en todos los casos en los que se elaboraron modelos con varios programas, AP resultó el más preciso con distancias promedio al modelo de referencia la mitad de cercanas que el resto de programas. Se corroboran aquí los resultados de Eltner y Schneider (2015) quienes compararon diferentes programas SfM, clasificándolos en dos categorías, los más simples (que no permiten introducir información de la cámara o puntos de control durante el ajuste de los bloques, tipo C, si bien C no fue usado en dicho trabajo) o aquellos más desarrollados (que sí permiten la utilización de parámetros de la cámara y puntos de control durante el ajuste, entre ellos AP). En dicho trabajo se incluyeron como programas SfM avanzados AP, MICMAC y APERO, si bien los errores fueron estimados sobre MDE y con disposiciones de la geometría de la toma con ejes paralelos y normales a la superficie (tipo UAV). Los resultados de Eltner y Schneider (2015) mostraron que para superficies naturales los tres programas avanzados obtenían precisiones muy similares (≈ 8 mm) mientras que aquellos más básicos (similares a C) presentaron valores de precisión inferior (>10 mm). En lo referente al tiempo de procesado, éste es función del número de fotogramas empleados y de las características del equipo. En el caso del software C, además depende de la conexión a

internet, ya que las fotografías son enviadas a un servidor de la compañía AUTODESK, donde se realiza el procesado. En términos generales, el trabajo de gabinete de cada uno de los modelos (foto-reconstrucción y georreferenciación) con un equipo convencional (procesador I7, 8 Gb de RAM a 2.5 GHz) puede desarrollarse en 8 horas.

Respecto a la aplicabilidad de los modelos generados cabe señalar que en el caso del glaciar rocoso del Corral del Veleta, las nubes de puntos y los MDE obtenidos podrían utilizarse en la monitorización sub-métrica del glaciar, con distancias medias al modelo tomado con el TLS de 0,28 m, 0,21 m y 0,12 m. Sin embargo, trabajos previos han mostrado que la dinámica de este glaciar presenta desplazamientos medios de 0,05 m a 0,10 m en planimetría y de -0,20 m a -0,25 m en altimetría (De Sanjosé et al., 2007), por lo que tan sólo podrían registrarse cambios en la superficie tras, al menos, dos años entre toma y toma. En cualquier caso, los modelos generados podrían utilizarse para elaborar cartografía precisa del glaciar o para la estimación de parámetros morfométricos del mismo.

En el caso del *calanchi* sucede algo similar, ya que la distancia media al modelo de referencia supera los 0,20 m (para el software AP) mientras que el rebajamiento medio que se registra en este tipo de forma ronda los $0,01 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. La Figura 4 muestra la foto-reconstrucción realizada con el software AP para este *calanchi*. De forma más específica, lo que se presenta es la estructura 3D de la nube de puntos y los valores de color (RGB) asociados a cada punto en la nube y extraídos de las fotografías originales. A la luz de las precisiones obtenidas para este tipo de superficies y si el objetivo de futuras aplicaciones es monitorizar cambios, los autores recomiendan la selección de pequeñas zonas dentro del *calanchi* que permitan una menor distancia cámara-objeto y una geometría claramente convergente. Mantener este tipo de geometría puede resultar difícil en una zona amplia del *calanchi* debido a lo abrupto e intrincado del paisaje con constantes cambios

en la orientación de la superficie. De nuevo, las precisiones obtenidas indican que los modelos resultantes podrían ser empleados para elaborar cartografía de precisión submétrica de las zonas de estudio o realizar descripciones morfométricas.

En el caso de las cabeceras de cárcava, el RPR calculado y las distancias medidas al modelo de referencia capturado con el TLS permitieron la monitorización de los cambios acaecidos en el canal a lo largo de 54 días en 2013 durante los que se registraron 289,43 mm de lluvia. Una explicación profunda de la metodología empleada en el cálculo, así como de los resultados obtenidos puede consultarse en Gómez-Gutiérrez et al. (2014b). Resumiendo, este seguimiento permitió analizar la dinámica espacio-temporal de cada cabecera, estableciéndose diferencias en el comportamiento de aquellas que se localizan en el propio cauce y otras que son de formación posterior y de tipo lateral cuya génesis se relaciona con la existencia de veredas y su utilización por parte del ganado como acceso lateral al propio cauce (Figura 5). La Figura 5

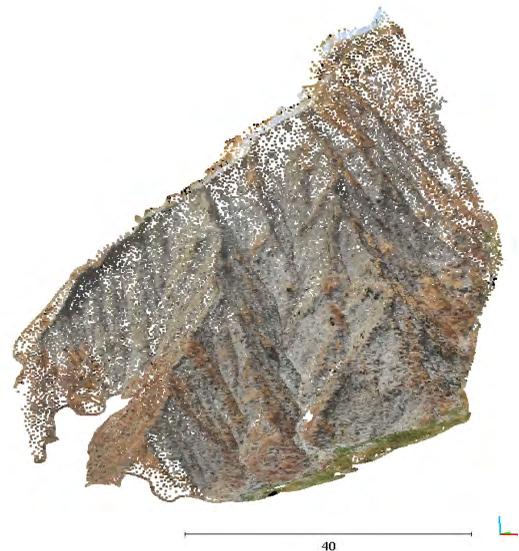


Figura 4: Foto-reconstrucción 3D obtenida para el *calanchi* utilizando el software Agisoft Photoscan (AP).

Figure 4: Three dimensional photo-reconstruction for the *calanchi* obtained using Agisoft Photoscan software (AP).

Modelo digital de diferencia de elevaciones

21/03/2013 al 03/04/2013

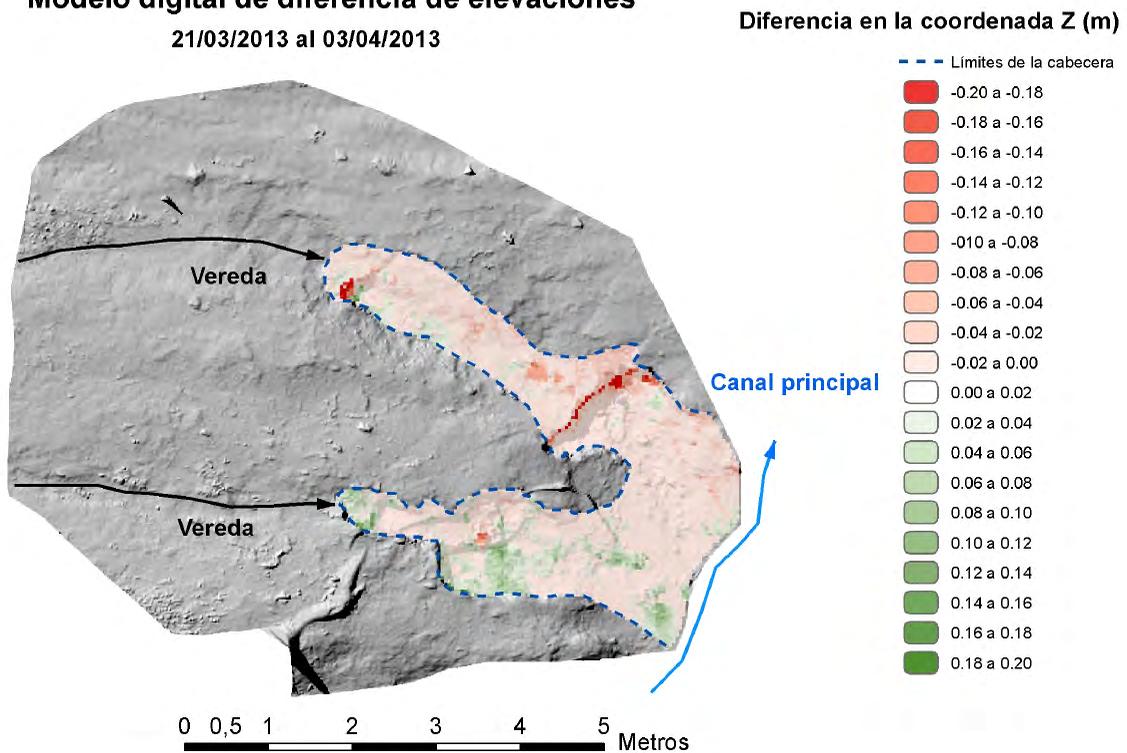


Figura 5: Modelo digital de diferencia de elevaciones para una cabecera de cárcava durante un período de seguimiento semanal. Los valores negativos, en rojo, denotan erosión mientras que los valores positivos, en verde, se corresponden con deposición de sedimentos. Los cambios se han calculado exclusivamente para el área dentro de la cabecera (zona interior a la línea discontinua), mostrándose de fondo un modelo digital de sombras que representa la microtopografía de la zona próxima a la cabecera.

Figure 5: Digital Elevation Model of differences for a gully headcut during one week study period. Negative figures correspond to soil erosion (in red) while positive figures correspond to sediment deposition (in green). Surface changes have been estimated exclusively for the area inside the headcut (within the blue-dashed line), showing in the rest of the map a digital hillshade model with the micro-topography of the surroundings.

presenta un claro ejemplo de los productos que pueden generarse a partir de las nubes de puntos obtenidas mediante foto-reconstrucción. Se trata de un mapa donde los valores de los píxeles muestran el cambio acaecido en la cota en dicha localización. Este modelo presenta un tamaño de píxel de 5 cm, mostrando cambios de rango centimétrico en cota y referidos a un intervalo temporal de una semana. Es decir, la precisión y coste de estas técnicas permiten el seguimiento intensivo a una escala muy detallada y con una frecuencia insólita.

4. Conclusiones

En este trabajo se han analizado y presentado comparativamente los resultados obtenidos con diversos planteamientos metodológicos para foto-reconstruir varias formas superficiales. Los resultados muestran la calidad de los productos generados mediante las técnicas de fotogrametría automatizada y su aplicabilidad para la descripción y el análisis de estas formas. Se analiza también la viabilidad de utilización de estas técnicas para diferentes distancias de observación y basándose en

la comparación entre la fiabilidad del modelo resultante y la magnitud y escala temporal de las variaciones superficiales en cada caso. Tan sólo en el caso de las cabeceras de cárcavas las técnicas presentadas resultaron útiles para la monitorización de las mismas empleando una escala temporal reducida. En el caso del glaciar y del *calanchi*, los modelos resultantes podrían utilizarse para registrar cambios empleando escalas temporales plurianuales. Los modelos obtenidos también podrían emplearse, en todos los casos, para producir cartografía precisa de cada forma así como para estimar parámetros morfométricos de las mismas. Se presentan, además, los parámetros tridimensionales que habitualmente se utilizan para testar la fiabilidad de dichos modelos y las técnicas para elaborarlos así como su interpretación. Los valores de estos parámetros fueron similares a los presentados por otros autores en la literatura en el caso del glaciar y las cabeceras de cárcava y ligeramente peores en el caso del *calanchi*. Respecto al software, aquellos que permiten modelos de calibración de cámara complejos se mostraron como más precisos (Agisoft Photoscan). Adicionalmente, y de forma introductoria, se presentan las publicaciones científicas más relevantes sobre la aplicación de las técnicas de foto-reconstrucción en Geomorfología, tanto internacionales como nacionales.

Agradecimientos

Ministerio de Economía y Competitividad (CGL2011-23361 y CGL2014-54822-R) y Gobierno de Extremadura (GR10071 y RNM017).

Bibliografía

- Caraballo-Arias, N.A., Conoscenti, C., Di Stefano, Caraballo-Arias, N.A., Conoscenti, C., Di Stefano, C. y Ferro, V., 2014. Testing GIS-morphometric analysis of some Sicilian badlands. *Catena* 113, 370-376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.021>
- Castillo, C., Pérez, R., James, M.R., Quinton, N.J., Taguas, E.V. y Gómez, A., 2012. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. *Soil Science Society of America Journal* 76, 1319-1332. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2011.0390>
- De Matías-Bejarano, J., De Sanjosé, J.J., López-Nicolás, G., Sagües, C. y Guerrero, J., 2009. Photogrammetric methodology for the production of geomorphologic maps: Application to the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Granada, Spain). *Remote Sensing* 1, 829-841. <http://dx.doi.org/10.3390/rs1040829>
- De Sanjosé, J.J., Atkinson, A.D.J., Salvador, F. y Gómez, A., 2007. Application of geomatic techniques to monitoring of the dynamics and to mapping of the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie* 51, 79-89. <http://dx.doi.org/10.1127/0372-8854/2007/0051S2-0079>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F. y Abellan, A., 2015. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments of a promising tool for geoscientists. *Earth Surf. Dynam. Discuss.* 3, 1445-1508. <http://dx.doi.org/10.5194/esurf-d-3-1445-2015>
- Eltner, A. y Schneider, D., 2015. Analysis of Different Methods for 3D Reconstruction of Natural Surfaces from Parallel-Axes UAV Images. *The Photogrammetric Record* 30, 279-299. <http://dx.doi.org/10.1111/phor.12115>
- 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, 421-430. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3366>
- Frankl, A., Stal, C., Abraha, A., Nyssen, J., Rieke-Zapp, D., De Wulf, A. y Poesen, J., 2015. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling. *Catena* 127, 92-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.016>
- Girardeau-Montaut, D., Roux, R.M. y Thibault, G., 2005. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner, in: ISPRS (Ed.), *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, the Netherlands, p. 6.
- Gómez-Gutiérrez, Á., de Sanjosé-Blasco, 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, 5407-5427. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70810269>

- Gómez-Gutiérrez, Á., de Sanjosé-Blasco, J., Lozano-Parra, J., Berenguer-Sempere, F. y de Matías-Bejarano, J., 2015. Does HDR Pre-Processing Improve the Accuracy of 3D Models Obtained by Means of two Conventional SfM-MVS Software Packages? The Case of the Corral del Veleta Rock Glacier. *Remote Sensing* 7, 10269.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.004>
- Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K. y Hamilton, T., 2013. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology* 194, 16-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.023>
- James, M.R. y Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research* 117, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Javernick, L., Brasington, J. y Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213, 166-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>
- Lague, D., Brodu, N. y Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, 10-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *Int. J. Comput. Vision* 60, 91-110. <http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Lucieer, A., Jong, S.M.d. y Turner, D., 2014a. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* 38, 97-116. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133313515293>
- Lucieer, A., Turner, D., King, D.H. y Robinson, S.A., 2014b. Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to capture micro-topography of antarctic moss beds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27, 53-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.011>
- Nadal-Romero, E., Revuelto, J., Errea, P. y López-Moreno, J.I., 2015. The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish Pyrenees). *SOIL* 1, 561-573. <http://dx.doi.org/10.5194/soil-1-561-2015>
- Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J. y Joswig, M., 2012. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology* 128, 2-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- Seitz, S.M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. y Szeliski, R., 2006. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE Computer Society, New York. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2006.19>
- 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, 1656-1671. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3747>
- Stumpf, A., Malet, J.P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M. y Skupinski, G., 2015. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology* 231, 130-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.039>
- Turner, D., Lucieer, A. y de Jong, S., 2015. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing* 7, 1736. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70201736>
- Ullman, S., 1979. The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society B* 203, 405-426. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. y Reynolds, J.M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

