



# Relevamiento topográfico de alta resolución: comparación de modelos del terreno mediante Estación Total y fotogrametría SfM-MVS. Aplicación en una cantera de suelos seleccionados, La Plata, Buenos Aires

Nicolás GUARDO<sup>1\*</sup>, Luciano LÓPEZ<sup>2-3</sup> y Andrés BILMES<sup>2-4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

<sup>3</sup>Instituto de Recursos Minerales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, BA, Argentina.

<sup>4</sup>Instituto Patagónico de Geología y Paleontología, Puerto Madryn, Chubut, Argentina

Email: nicolasguardo24@gmail.com

Editor: Diego A. Kietzmann

Recibido: 14 de noviembre de 2020

Aceptado: 26 de enero de 2021

## RESUMEN

Se realizó el relevamiento topográfico de una cantera de suelos seleccionados ubicada en el Partido de La Plata mediante dos técnicas de relevamiento de campo. Un relevamiento fue realizado usando estación total y otro utilizando la técnica fotogramétrica *Structure from Motion-Multi View Stereo* (SfM-MVS) con plataforma aérea, siendo el resultado final de cada una un modelo digital del terreno. Ambas metodologías se emplearon con el fin de poder compararlas entre sí, analizar el alcance y las limitaciones, como también la precisión en el cálculo de volumen para la cubicación del material extraído. Se compararon los resultados entre ambas técnicas a partir de un *DEM of Difference* y el cálculo de volumen de material extraído. El relevamiento con SfM-MVS fue validado a partir de puntos de control independientes obtenidos con GPS diferencial y el error absoluto del modelo es de 9.26 centímetros. El modelo generado con Estación Total muestra que las mayores diferencias se deben a zonas sin datos donde se realizó la interpolación de curvas de nivel. El modelo generado por SfM-MVS concentra los mayores errores en las regiones con pendientes mayores a 30° y con vegetación densa. Los volúmenes obtenidos con ambos métodos indican diferencias menores al 10 %. La técnica SfM-MVS constituye una herramienta rápida, de bajo costo y efectiva para el relevamiento de canteras ya que la alta densidad de puntos y el registro sistemático de los mismos producen representaciones más completas y realistas de las zonas relevadas, en comparación con técnicas tradicionales como la Estación Total.

**Palabras clave:** Topografía, VANT, structure from motion, modelo digital del terreno, *DEM of difference*.

## ABSTRACT

*High resolution topographic survey: comparison of terrain models using Total Station and SfM-MVS photogrammetry. Application in a quarry of selected soils, La Plata, Buenos Aires.*

The topographic survey of a selected soil quarry located in the Partido de La Plata was carried out, using two field survey techniques. One survey was carried out using a Total Station and another using the Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS) photogrammetric technique with an aerial platform, obtaining as the final result of each one a digital terrain model. Both methodologies were used in order to be able to compare them with each other, analyzing the scope and limitations, as well as the precision in the volume calculation of the extracted material. The results between both techniques were compared generating a DEM of Difference and calculating the volume of extracted material. The SfM-MVS survey was validated using independent control points obtained with diffe-

rential GPS and the absolute error of the model is 9.26 centimeters. The model generated with Total Station shows that the greatest differences are due to areas with no data where contour interpolation was performed. The model generated by SfM-MVS concentrates the greatest errors in the regions with slopes greater than  $30^\circ$  and with dense vegetation. The volumes obtained with both methods indicate differences of less than 10 %. The SfM-MVS technique constitutes a fast, low-cost and effective tool for the survey of quarries due to the high density of points and their systematic registration produce more complete and realistic representations of the surveyed areas, compared to traditional techniques such as Total Station.

**Keywords:** Topography, UAV, structure from motion, digital terrain model, dem of difference

## INTRODUCCIÓN

La generación de modelos topográficos de alta resolución espacial reviste gran interés y aplicación dentro del campo de las geociencias (Fonstad et al. 2013, Carrivick et al. 2016). Tradicionalmente, el enfoque se basa en obtener una representación lo más completa y precisa posible de la superficie, a partir de puntos con coordenadas espaciales que tengan relevancia topográfica, y con estos realizar interpolaciones manuales o semiautomáticas en combinación con imágenes satelitales o fotos aéreas.

En la actualidad existe una amplia variedad de técnicas y metodologías que permiten llevar a cabo mediciones de puntos sobre el terreno con precisión y resolución submétrica. Las técnicas más comunes y accesibles empleadas en relevamientos topográficos son la estación total (ET) y el GPS diferencial (GPSd). Si bien con estas técnicas se obtiene una precisión subdecimétrica, la generación de modelos de alta resolución espacial (con alta densidad de puntos), requiere una importante inversión de tiempo, *hardware* y *software* (Fonstad et al. 2013). Además, ciertas características del terreno, tales como la presencia de pendientes pronunciadas, o una pobre cobertura satelital pueden llevar a que los relevamientos que utilizan estos instrumentos se vuelvan dificultosos (Westoby et al. 2012).

Actualmente, el relevamiento espacial de datos de campo se encuentra en una etapa de "revolución" en términos tecnológicos. El desarrollo de computadoras con alto poder de procesamiento, vehículos aéreos no tripulados y nuevas técnicas fotogramétricas, tales como *Structure from Motion-Multi View Stereo* (SfM-MVS), hacen posible que las representaciones de la superficie terrestre puedan realizarse con alta resolución espacial, de una manera rápida y económica. Sin embargo, estudios comparativos entre técnicas de ET o GPSd con técnicas aeroterrestres de fotogrametría SfM-MVS muestran resultados muy variables en función de las características del terreno y la estrategia de adquisición de datos, georreferenciación y validación de los modelos generados (Tonkin et al. 2014, Sanz-Ablanedo et al. 2018, D'Elia et al. 2021). El cono-

cimiento acerca del alcance y las limitaciones de relevamientos topográficos utilizando la técnica fotogramétrica SfM-MVS cobra relevancia, en especial en tareas que necesiten de la comparación temporal de variaciones en el relieve, como son explotaciones a cielo abierto de los recursos naturales.

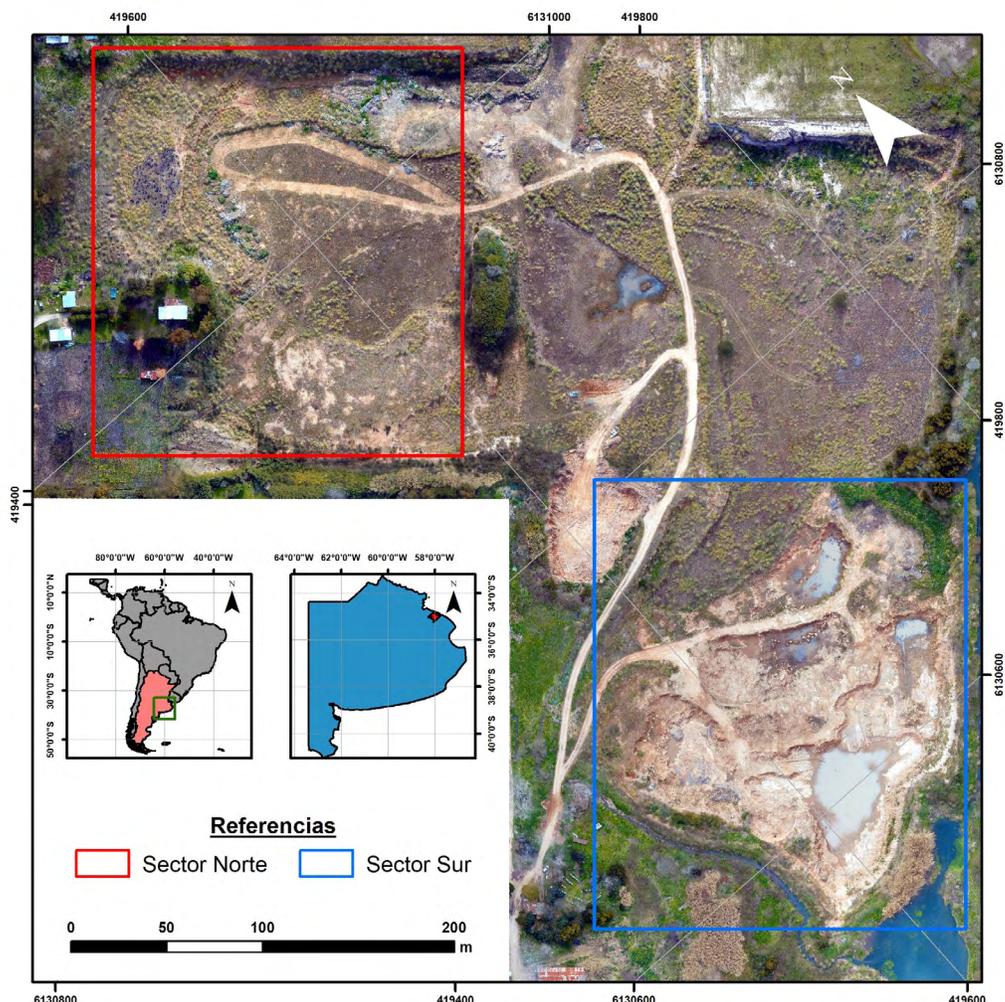
El objetivo del presente trabajo consiste en comparar el relevamiento topográfico de una cantera de suelos utilizando la técnica tradicional con ET y el relevamiento empleando la técnica fotogramétrica SfM-MVS aérea. Asimismo, se analizan los alcances y limitaciones de ambas técnicas y se realiza un cálculo de volúmenes de material extraído de la cantera.

## MARCO GEOLÓGICO

La cantera Alonso-Di Ianni se encuentra ubicada en el Barrio Aeropuerto del Partido de La Plata y es explotada para la extracción de suelos seleccionados, empleados principalmente para el relleno de caminos y obras civiles. La cantera ocupa una superficie aproximada de 18 ha y presenta dos sectores con características contrastantes, el sector norte y el sector sur (Fig. 1). El primero de ellos constituye una zona que se encuentra sin explotar en la actualidad, donde la explotación se detuvo hace 10 años, y que presenta abundante vegetación. El sector sur es actualmente una zona de explotación activa que se caracteriza por la escasa o nula presencia de vegetación.

## METODOLOGÍA

Las metodologías de trabajo utilizadas para la adquisición de datos topográficos mediante ET y SfM-MVS aéreo (Fig. 2), tuvieron un procedimiento inicial compartido que consistió en la demarcación y registro de puntos de control de campo (PC). Los PC fueron ubicados y distribuidos de manera estratégica a lo largo de toda la superficie y demarcados mediante estacas para su fácil reconocimiento. Para la obtención de las coordenadas espaciales de estos puntos se



**Figura 1.** Ubicación de la cantera Alonso-Di Ianni y detalle de los sectores norte y sur.

utilizó un GPSd modelo Trimble® R2, en modo *Real Time Extended* (RTX; exactitud horizontal  $\pm 2$  cm y exactitud vertical  $\pm 5$  cm), integrado por un receptor y colector sustentados por un bastón rígido (Fig. 3a). En total fueron levantados 35 puntos de control, con sistema de coordenadas proyectadas UTM Zona 21S, con datum horizontal WGS 1984 y datum vertical EGM2008.

Las técnicas de relevamiento topográfico empleadas utilizaron como base este armazón de puntos de control. A continuación, se describen los flujos de trabajo de ambas técnicas.

### Relevamiento con estación total

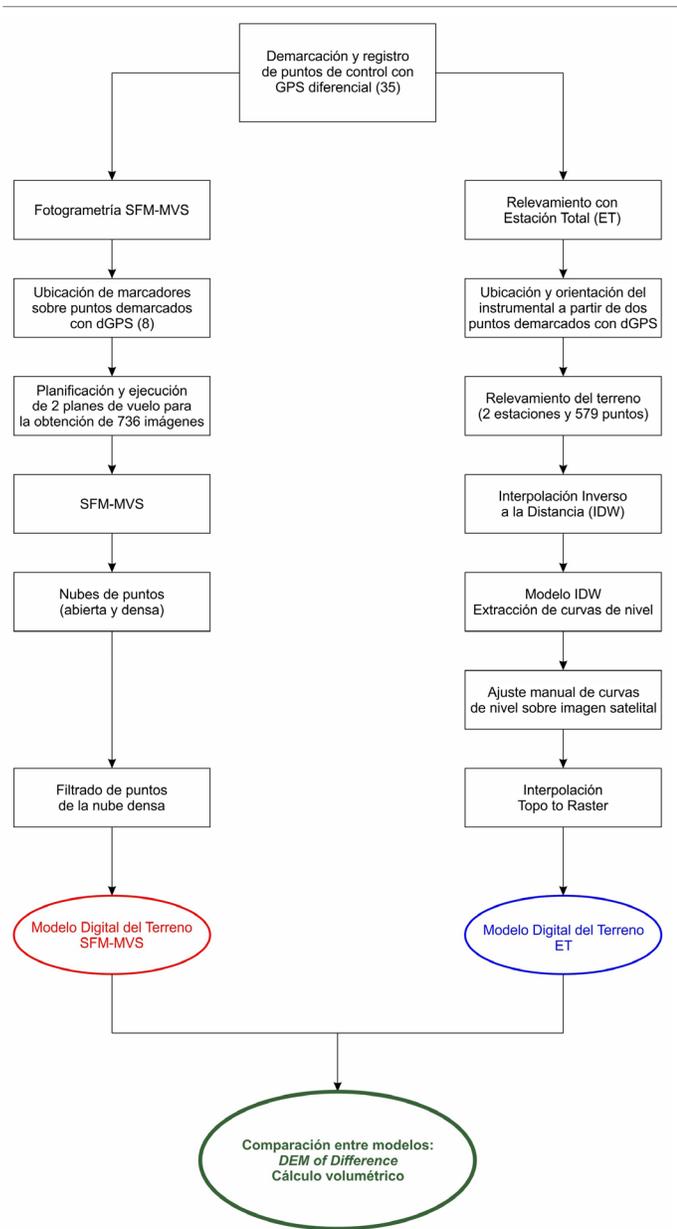
El relevamiento con ET se realizó de forma independiente en el sector norte y en el sector sur. El instrumental utilizado consistió en una estación total Kolida® 442, con una precisión de  $2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$  (Fig. 3b).

Cada uno de los sectores se relevó mediante radiación a partir de una única estación, la cual fue posicionada y orientada utilizando las coordenadas de dos puntos obtenidos con

GPSd. En el sector norte se levantaron en total 194 puntos, mientras que para el sector sur fueron registrados 385 puntos (Fig. 4).

El procesamiento de los puntos adquiridos con ET fue realizado a través del sistema de información geográfica ArcGIS 10.0, bajo licencia académica. Para la interpolación, se utilizó el método Inverso a la Distancia al Cuadrado (*Inverse Distance Weighting*, IDW), con el cual se generó un modelo de elevación digital del terreno (ráster) y, posteriormente, se extrajeron las curvas de nivel.

Con la finalidad de representar adecuadamente el relieve de la zona de estudio, se procedió a realizar una corrección manual de las curvas de nivel generadas por interpolación en las zonas donde se evidenciaba que las curvas no representaban ajustadamente la topografía. Para ello, se utilizó una imagen satelital actualizada de *Google Earth* como referencia, sumado a los datos de altura de los puntos relevados en campo. Finalmente, se generó un modelo de elevación del terreno, a partir de la transformación de las mismas de for-



**Figura 2.** Flujos de trabajo empleados en los relevamientos con fotogrametría *Structure from Motion-Multi View Stereo* y estación total.

mato vectorial a formato ráster (herramienta de interpolación *Topo to Raster*).

### Fotogrametría *Structure from Motion-Multi View Stereo*

La técnica *Structure from Motion-Multi View Stereo* (SfM-MVS) constituye un método de relevamiento fotogramétrico de bajo costo, desarrollado a partir de la década de 1980 y utilizado para reconstrucciones topográficas de alta precisión y resolución espacial (Westoby et al. 2012). La misma opera bajo los mismos principios que la fotogrametría analógica, en la cual la reconstrucción de la geometría tridimensional de la

superficie se resuelve mediante la superposición de imágenes desplazadas, es decir, a partir de pares estereoscópicos.

La principal diferencia entre dicha técnica y la fotogrametría tradicional radica en que, para esta metodología, no resulta necesario especificar la posición espacial (X, Y, Z) de la cámara al momento de la toma de las imágenes como tampoco los parámetros y características intrínsecas y extrínsecas de la misma (Westoby et al. 2012). Si bien se definen algunos conceptos generales acerca de la presente técnica, se detallará el flujo de trabajo de la misma como parte de la metodología de trabajo, sugiriéndose los trabajos de Snavely et al. (2006, 2008) y Carrivick et al. (2016) para una revisión más exhaustiva.

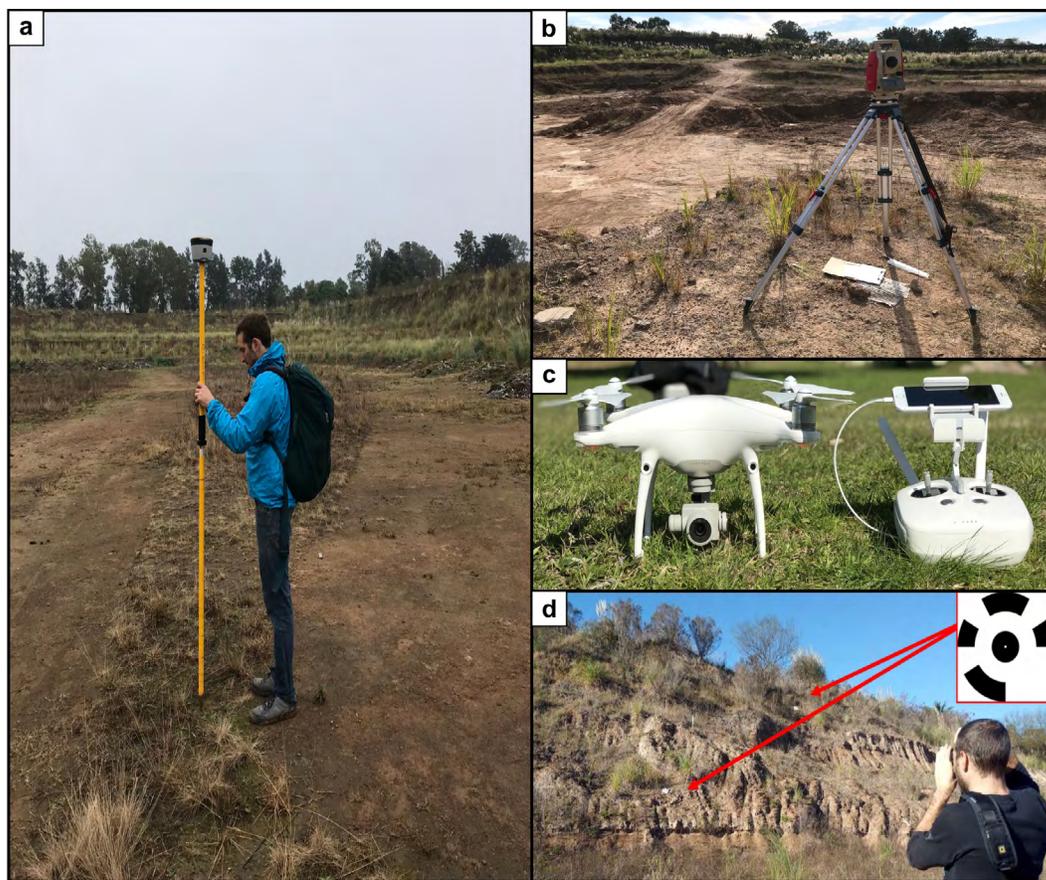
#### **Ubicación de marcadores y adquisición de imágenes:**

Previo al relevamiento aéreo, se colocaron marcadores sobre ocho de los puntos demarcados previamente con GPSd, de manera de poder identificarlos en las imágenes y utilizarlos como base para la georreferenciación y escalado del modelo (Fig. 4). Los marcadores consisten en impresiones en hojas A4 de marcadores estandarizados generados por el *Agisoft Metashape Professional* (Fig. 3d). A su vez, debido a que la cantera se encuentra en cercanías al aeropuerto de la ciudad, y según la normativa vigente, se solicitó autorización a la torre de control del mismo para poder llevar a cabo la operación.

Las fotografías fueron tomadas en un único día de trabajo, a partir de la ejecución de dos planes de vuelo con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) modelo DJI Phantom 4 Pro, con cámara integrada, caracterizada por un sensor CMOS de 1" de tamaño y 20 megapíxeles de resolución (Fig. 3c).

Con el fin de optimizar el tiempo de vuelo y garantizar la cobertura y superposición necesarias, los planes de vuelo se diseñaron con la aplicación *Pix4Dcapture*, bajo plataforma iOS. Se empleó el formato de diseño doble grilla, con líneas de vuelo perpendiculares entre sí, garantizando un solapamiento frontal del 80 % y un solapamiento lateral del 60 %. Se adquirieron en total 736 imágenes, las cuales se tomaron desde una posición cenital. La superficie relevada fue de aproximadamente 40 hectáreas.

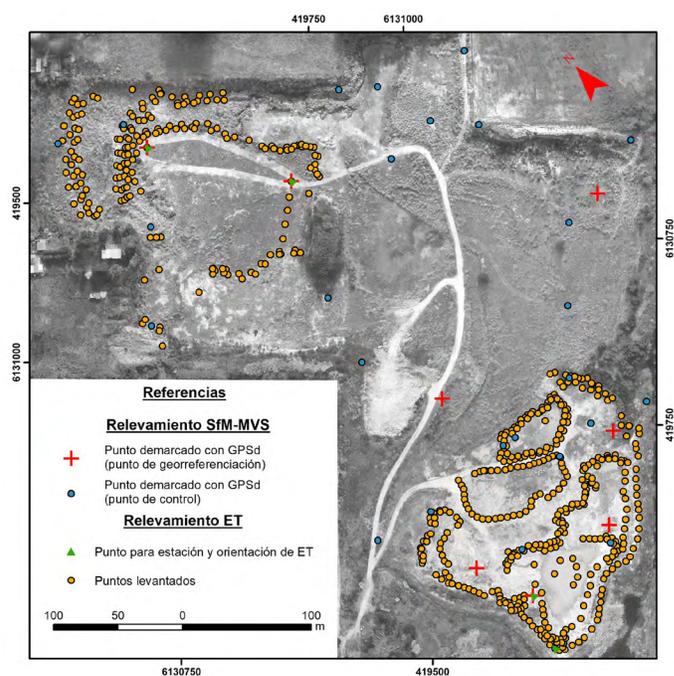
**Procesamiento de imágenes y análisis:** El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando el software fotogramétrico *Agisoft Metashape Professional* bajo licencia académica, cuyo flujo de trabajo se caracteriza por la aplicación de una serie de algoritmos que llevan a cabo la reconstrucción de la escena en cuestión. Los principales algoritmos son el SIFT (Lowe, 2004), que identifica para cada imagen, rasgos que resultan invariantes respecto a la escala, rotación de la imagen, cambios en los puntos de vista tridimensionales e iluminación, el *Bundler Adjustment* cuyo objetivo es recons-



**Figura 3.** Metodología del trabajo: a) toma de puntos con GPS diferencial; b) relevamiento con estación total de la cantera; c) vehículo aéreo no tripulado y control empleados en el relevamiento aéreo; d) marcadores utilizados para identificar los puntos en el terreno.

truir, de manera simultánea, la estructura tridimensional, las variables de calibración de la cámara (parámetros intrínsecos) y las posiciones y orientaciones de la cámara (parámetros extrínsecos), dando como resultado una nube de puntos dispersa o abierta, y el MVS (Furukawa y Ponce, 2010), los cuales permiten obtener una nube de puntos densa, usualmente de millones de puntos con posición X, Y, y Z.

El resultado final fue la generación de un modelo digital de superficie (MDS). Para la conversión de este modelo en un modelo digital de terreno (MDT), se utilizó el algoritmo  *Cloth Simulation Filter* (CSF, Zhang et al. 2016), integrado en el software *CloudCompare*. Con este proceso, se eliminaron los objetos naturales y antrópicos que se encontraban sobre la superficie del terreno (construcciones, vegetación, maquinaria). Este método utiliza una secuencia de interpolación en la cual se genera una superficie grillada, con un tamaño de celda definido por el usuario, y se realiza una evaluación y clasificación de los puntos que se encuentran sobre la superficie interpolada como puntos fuera del terreno y puntos del terreno, es decir, aquellos que se ajustan a la superficie. Se realizó una nueva interpolación exclusivamente con los puntos clasificados como puntos del terreno (Anders et al. 2019), obteniéndose de esta manera el MDT. El modelo digital del terreno final presenta una resolución de 25 cm y un error cua-



**Figura 4.** Detalle de los puntos empleados para el relevamiento de la cantera a partir de las diferentes técnicas. Se identifican los puntos tomados para el relevamiento con fotogrametría *Structure from Motion-Multi View Stereo* (puntos de georreferenciación y puntos de control) y los puntos para el relevamiento del sector norte y sur con estación total (puntos de posicionamiento y orientación del instrumental y puntos relevados).

**Cuadro 1.** Validación del modelo SfM-MVS a partir de datos GPSd.

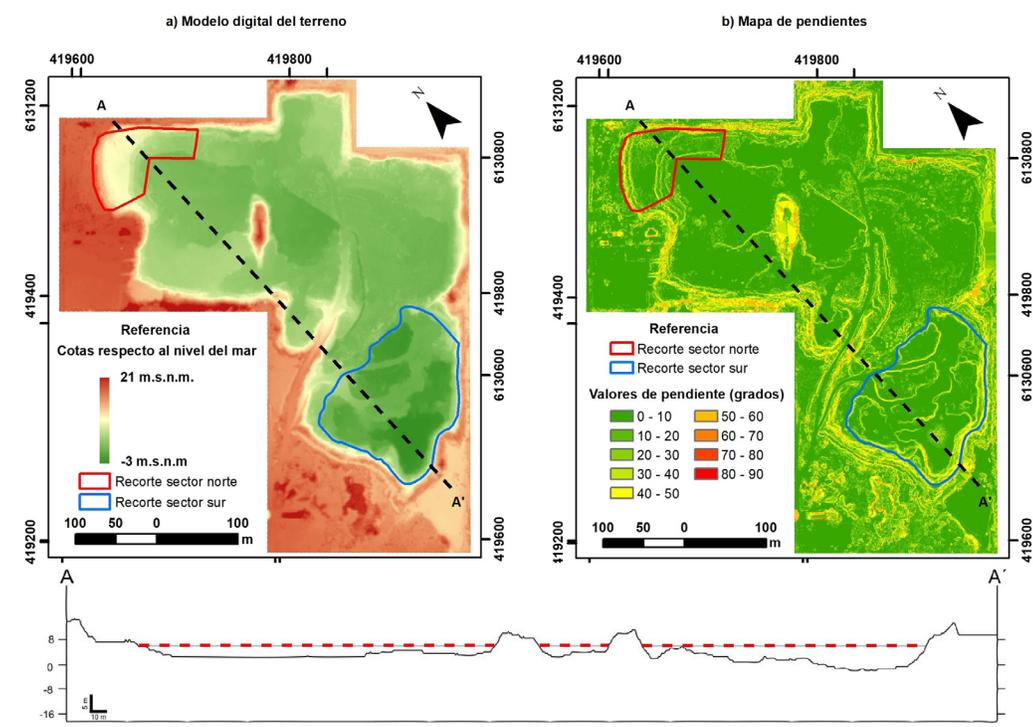
Punto	Elevación GPSd [m.s.n.m.]	Elevación DEM Filtrado [m.s.n.m.]	$\Delta Z$ [m]
2	8.10	8.40	-0.30
3	6.77	6.69	0.08
4	6.09	5.99	0.10
5	7.37	7.30	0.07
6	14.07	13.75	0.32
7	7.48	7.37	0.11
8	2.97	2.85	0.12
11	8.46	8.20	0.26
12	2.62	2.52	0.10
13	2.37	2.36	0.01
14	3.84	3.80	0.04
15	8.69	8.35	0.34
16	10.78	10.80	-0.02
17	9.30	9.27	0.03
19	1.99	2.04	-0.05
20	1.57	1.65	-0.08
21	5.36	5.33	0.03
22	11.29	11.33	-0.04
24	1.71	1.66	0.05
25	1.48	1.38	0.10
27	-0.79	-0.77	-0.02
28	1.82	1.82	0.00
30	7.12	7.06	0.06
32	4.25	4.21	0.04
33	1.69	1.59	0.10
34	-0.36	-0.36	0.00
35	12.46	12.43	0.03

drático medio (*root mean square error*, RMSE) de 5.24 centímetros (Fig. 5).

**Validación del modelo SfM-MVS:** El modelo fue validado mediante la técnica de validación con datos de altura de los PC del terreno (para más detalle véase Bilmes et al. 2019). Este proceso fue realizado usando 27 PC con coordenadas X, Y, Z, obtenidos mediante GPSd. Estos puntos no fueron utilizados para la georreferenciación del modelo, por lo tanto constituyen puntos independientes y adecuados para la validación (Fig. 4). Se obtuvieron los valores de altura del modelo SfM-MVS y se compararon con los valores de altura del GPSd. Para ello, se extrajeron los valores de altura del modelo filtrado correspondiente a la posición de los puntos y se realizó la diferencia entre el valor de altura entregado por la lectura del GPSd y el valor extraído (Cuadro 1). La validación indica un error absoluto promedio en la vertical de 9.26 centímetros.

### Comparación de modelos

La comparación entre técnicas para ambos sectores se realizó mediante un *DEM of Difference* (DoD), a partir de la sustracción algebraica de los valores de altura de cada píxel del MDT SfM-MVS ( $MDT_{SfM}$ ) y el MDT tradicional ( $MDT_{ET}$ ), es decir,  $MDT_{SfM} - MDT_{ET}$ . A su vez, se realizaron cálculos de volumen en cada uno de los sectores. Tanto el DoD como los cálculos de volumen se efectuaron empleando el *software ArcGIS 10.0*.



**Figura 5.** Modelo digital del terreno, mapa de pendientes de la cantera Alonso-Di Ianni y perfil topográfico que atraviesa el sector norte y el sector sur. La línea roja discontinua del perfil indica la superficie de referencia (6 m) utilizada para el cálculo de volumen.

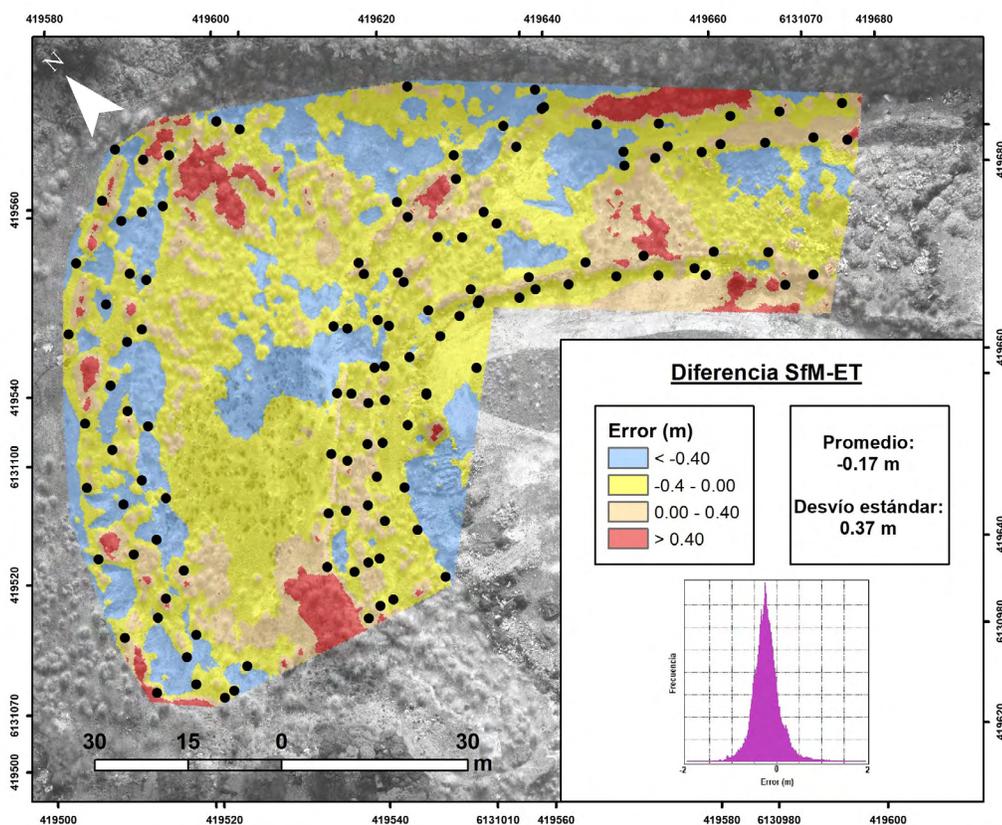


Figura 6. DEM of Difference del sector norte.

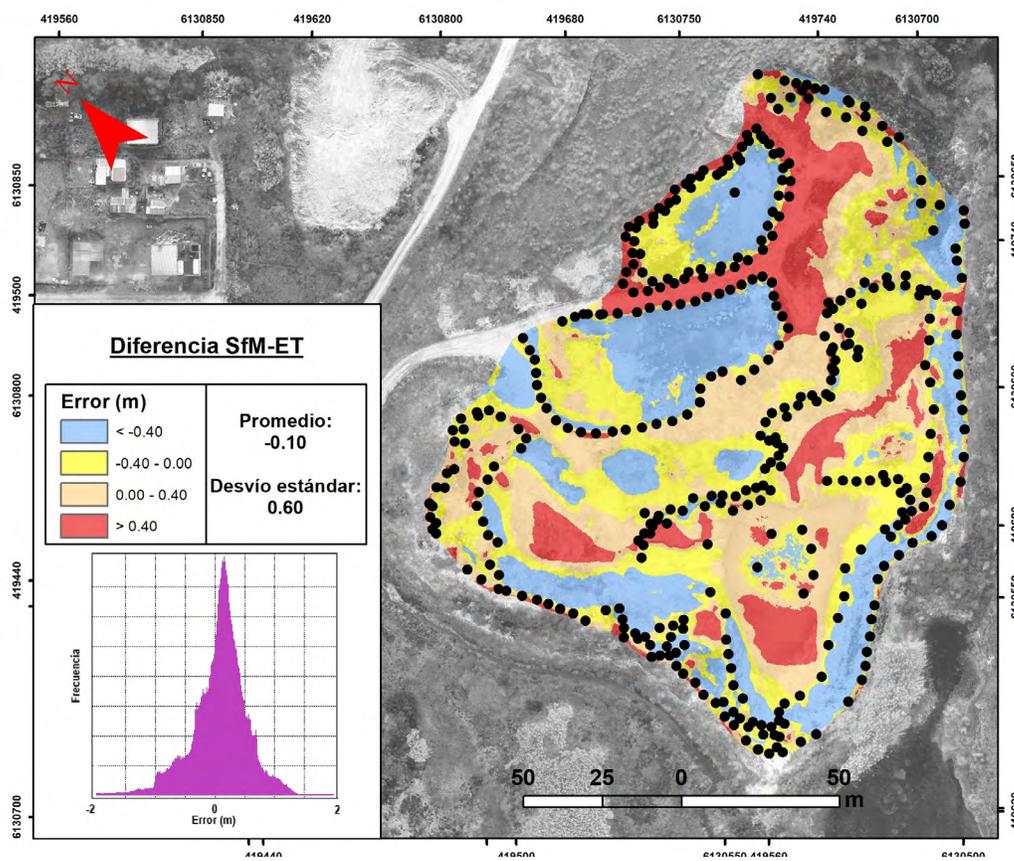


Figura 7. DEM of Difference del sector sur.

## RESULTADOS

En análisis del modelo de elevación del terreno obtenido mediante el relevamiento SfM-MVS indica que las mayores alturas se encuentran principalmente en los límites de la cantera y en un pequeño sector elongado ubicado en el sector centro norte del área relevada, que se corresponde a una zona remanente de la explotación, alcanzando valores de 21 m (Fig. 5a). Por otro lado, las menores alturas se encuentran principalmente en el sector sur, donde se registran cotas de -3 metros.

Las mayores pendientes de la cantera se observan en los márgenes (Fig. 5b), con superficies caracterizadas por gradientes comprendidos principalmente entre 45° y 60°, pudiendo superar incluso 70°, mientras que, hacia el interior de la misma, las pendientes tienden a ser más suaves. En el sector norte el piso de cantera es plano y tiene una cota de 2 metros. En el extremo noroeste del mismo se presenta un banco con morfología rectangular elevado aproximadamente 5 m por encima del piso de la cantera. Por otro lado, el sector sur exhibe una mayor profundidad y la topografía en esta zona presenta mayores variaciones en las pendientes, con caminos internos y una explotación mucho más selectiva, que alcanza las cotas más bajas en el extremo sudeste de la cantera, con valores de hasta -3 m (Fig. 5).

### Diferencia entre los modelos de elevación digital

El análisis de los *DEM of Difference* (DoD) de los sectores norte y sur (Fig. 6 y Fig. 7) y los cálculos de volumen, comparativos de las técnicas SfM-MVS y ET, permiten definir patrones, con los cuales pueden determinarse alcances y limitaciones de ambas técnicas como herramientas topográficas y para realizar cálculos de volumen.

En el sector norte, las variaciones de altura registradas en el DoD presentan un promedio de - 0.17 cm. En la zona relevada, los errores registrados varían mayoritariamente entre - 0.40 y 0.40 m (Fig. 6). Localmente, hay zonas con errores mayores, con datos puntuales mínimo y máximo de - 2.25 y 2.42 m, respectivamente. Las zonas que registran las mayores diferencias entre ambos modelos corresponden a sectores sin puntos relevados en el campo con ET, cuyas alturas han sido interpoladas en el modelo final ( $MDT_{ET}$ ). A su vez, se observan zonas puntuales donde el error es inferior a - 0.40 y superior a 0.40 metros, en las cuales las pendientes resultan ser bajas. Esto podría deberse a que, si bien no hay datos relevados, dichos sectores coinciden con la presencia de vegetación tupida y densa, que podría estar introduciendo

errores debido al filtrado incorrecto de la misma.

Con respecto al sector sur, se observa un comportamiento de errores similar al modelo previamente descrito. El modelo diferencial obtenido muestra que las variaciones en términos de error promedio del modelo son de - 0.10 m, con predominio de zonas con errores comprendidos entre - 0.40 y 0.40 m, en donde se registran todos los puntos relevados en el campo (Fig. 7). Las mayores diferencias registraron valores puntuales mínimo y máximo de hasta - 2.91 y 2.44 m respectivamente. Estos valores se ubican en regiones donde los datos de ET fueron interpolados y en regiones con pendientes elevadas (mayores a 30°).

### Cálculo de volumen

A fin de comparar las técnicas, se realizaron cálculos volumétricos de los dos sectores para determinar cuantitativamente las diferencias obtenidas a partir de los dos modelos generados.

Para obtener el volumen extraído, se definió un plano horizontal de referencia, por debajo del cual se realizaron los cálculos. Para ambos sectores, los volúmenes se calcularon tomando como referencia la cota de 6 metros.

Los resultados de los cálculos (Cuadro 2) muestran que los volúmenes en el sector norte para SfM-MVS y ET son 6190.05 m<sup>3</sup> y 5623.86 m<sup>3</sup>, respectivamente. En el caso del sector sur, el volumen calculado a partir del modelo SfM-MVS es de 110526.49 m<sup>3</sup> mientras que el volumen a partir del modelo relevado mediante ET es de 108342.91 m<sup>3</sup>.

## DISCUSIÓN

Los modelos obtenidos con ET y SfM-MVS muestran significativa concordancia en gran parte de ellos. Sin embargo, se han registrado diferencias y/o desviaciones sectorizadas, en lo que respecta a la coordenada vertical. Conocer las fuentes de estas diferencias es primordial para evitar sobreestimaciones o subestimaciones de áreas o volúmenes que provengan de un modelo de elevación digital del terreno.

**Cuadro 2.** Resultados de los cálculos volumétricos en ambos sectores, para las dos técnicas de relevamiento empleadas.

Técnica de relevamiento	Volumen [m <sup>3</sup> ]	
	Sector norte	Sector sur
SfM-MVS	6190.05	110526.49
ET	5623.86	108342.91
Diferencia entre los modelos	566.19 (9.14%)	2183.58 (1.97 %)

El error intrínseco de la técnica fotogramétrica SfM-MVS, normalmente cuantificado a partir del Error Cuadrático Medio del modelo (RMSE), depende fundamentalmente de la distancia de adquisición de las fotografías y de la cantidad y distribución de los puntos utilizados para la georreferenciación y validación de los modelos (Carrivick et al. 2016, Clapuyt et al. 2016, Sanz-Ablanedo et al. 2018, Bilmes et al. 2019). Los errores promedio de los modelos norte y sur (- 0.10 y - 0.17 m, Fig. 6 y Fig. 7), presentaron valores coherentes con el RMSE esperado para la altura de vuelo utilizada en este trabajo, es decir, con una altura de vuelo de 108 m sobre el terreno, es esperable un RSME de  $\pm 0.205$  m (Carrivick et al. 2016). Por otra parte, la demarcación y utilización de puntos de georreferenciación ( $n = 8$ ) y puntos de validación ( $n = 27$ ) distribuidos de manera homogénea en la zona de estudio permitió obtener un modelo final validado con un RMSE subdecimétrico, de solo 9.26 centímetros.

La calidad del modelo construido descarta posibles fuentes de error intrínsecas de la técnica SFM-MVS y habilita el análisis de potenciales fuentes de error extrínsecas que expliquen diferencias entre esta técnica y el relevamiento con ET.

Los resultados obtenidos permiten avanzar en la discusión de tres fuentes potenciales de error, que incluyen: (a) problemas de interpolación de los puntos tomados con la ET, (b) problemas de registro de ET y SfM-MVS en zonas con pendientes pronunciadas y (c) problemas de registro de zonas con cambios contrastantes de vegetación con la técnica SfM-MVS.

Al realizar un relevamiento mediante la obtención directa de cada punto (ET), se establece un criterio subjetivo en la adquisición de los datos. La toma de puntos en los quiebres de pendientes resulta la mejor estrategia para el relevamiento (Bangen et al. 2014), ya que reduce el número de puntos para representar la topografía (Brasington et al. 2003). Por lo tanto, el relevamiento estará condicionado por la experiencia, entrenamiento y habilidad del operador, mientras que la precisión y exactitud del modelo final dependerán de esto último.

Los puntos relevados con ET son representativos de la superficie, sin embargo, al no tratarse de un levantamiento sistemático, pueden existir áreas carentes de información o con irregularidades topográficas menores, que son descartadas por el operador. En tal sentido, el método de interpolación lleva a simplificaciones que, como puede verse en este trabajo, generan las mayores divergencias entre las técnicas (Fig. 6 y Fig. 7). En los sectores donde fueron relevados puntos con ET, se registran errores por debajo de 0.4 m (Fig. 6 y Fig. 7). Si se observan los sectores adyacentes a los puntos, se refleja un incremento en el error, por encima del valor mencionado. Vinculado a la interpolación, también se observa que los cál-

culos de volumen reflejan subestimaciones para el caso de la técnica tradicional.

Los problemas de registro de ET y SfM-MVS en zonas con pendientes pronunciadas ya han sido descritos en la literatura, demostrándose que pueden desarrollarse errores de hasta un orden de magnitud superior a la media del modelo en zonas con elevados valores de pendiente (Tonkin et al. 2014).

Los sectores con valores de pendiente elevados, como el límite oriental del sector sur de este trabajo, muestran una diferencia importante entre los valores de altura de los puntos tomados con ET y los valores de altura extraídos del MDT SfM-MVS para los mismos puntos, en donde zonas con valores de pendiente mayores a  $30^\circ$  registran diferencias de más de un metro de error en la componente vertical (Fig. 7).

Finalmente, otro factor que influye en las diferencias encontradas entre los modelos generados por las distintas técnicas se encuentra en la presencia o ausencia de vegetación. La vegetación constituye un factor que influye negativamente, tanto por la dificultad para representar correctamente la superficie de los modelos de elevación fotogramétricos como también por bajar la calidad de los mismos (Micheletti et al. 2014, Tonkin et al. 2014). Para minimizar el impacto de la vegetación en el modelo final, se realizó un filtrado con el fin de eliminar tanto la vegetación como otros objetos antrópicos. Este algoritmo emplea un filtro que separa los puntos correspondientes al terreno de aquellos que sobresalen del mismo, y estos últimos son eliminados, por lo tanto los valores de cota de estas zonas son interpolados a partir de los puntos cercanos, lo cual puede introducir errores en el resultado final. Sin embargo, en zonas con vegetación densa y a pesar del filtrado realizado, resulta difícil evitar diferencias superiores a 0.4 m que pueden llegar a superar 1 m (Fig. 6).

Relevar con ET la densidad de puntos que se obtiene en un modelo de SfM-MVS implica tiempos y logísticas poco viables para los plazos y condiciones normales de un levantamiento topográfico. Por otra parte, si bien los MDT construidos a partir de fotogrametría SfM-MVS aérea pueden registrar problemas considerables en zonas con cambios de patrones en cuanto a la vegetación y pendientes superiores a  $30^\circ$ , la alta densidad de puntos relevados por superficie minimiza las áreas con información interpolada, algo que este trabajo demuestra ser uno de los puntos más débiles de los MDT construidos con ET. La precisión en el cálculo de volumen de recursos naturales utilizando la técnica SfM-MVS resulta muy aceptable respecto de la técnica tradicional con ET. Si bien la validación del modelo SfM-MVS demuestra un error asociado al mismo, la densidad de datos relevada con ET resulta acotada en comparación con la anterior, por lo cual pueden existir subestimaciones o

sobreestimaciones que representen más del 9 % del volumen total calculado.

Por otro lado, se observa que en zonas con diferencias de altura de 10 m aproximadamente (sector sur) o mayores, la diferencia entre las técnicas para el cálculo de volumen resulta ser baja. Si la diferencia de altura entre el plano de referencia y la superficie del terreno es de 2 m o menor (sector norte), las divergencias entre los modelos pueden alcanzar errores de cálculo del orden del 10 %.

## CONCLUSIONES

Se realizó la comparación de técnicas de relevamiento topográfico con Estación Total y con fotogrametría SfM-MVS en una cantera de suelos de la localidad de La Plata, obteniéndose como resultado dos modelos de elevación que muestran gran concordancia entre sí. El modelo SfM-MVS fue validado empleando puntos tomados con GPSd que no se emplearon en la georreferenciación del mismo y los errores correspondientes a la coordenada vertical se encuentran comprendidos entre  $\pm 0.30$  m, siendo el promedio absoluto de 9.26 cm. Las mayores diferencias entre los modelos se vinculan, en el relevamiento con ET, a la interpolación de los puntos levantados, mientras que en el caso del modelo SfM-MVS los mayores errores están asociados principalmente a zonas con pendientes pronunciadas, registrándose variaciones menores que pueden ser explicadas por la presencia de vegetación en ambos sectores. Por otra parte, los cálculos de volumen realizados arrojan diferencias que llegan a ser del 10 %, que se relacionan principalmente a la densidad de puntos obtenida con cada técnica y a la diferencia de altura entre la superficie de referencia y el piso del terreno.

La técnica SfM-MVS resulta una herramienta rápida, de bajo costo y efectiva para llevar a cabo relevamientos de canteras debido a que la alta densidad de puntos, sumada al registro sistemático de los mismos, producen representaciones realistas de las zonas relevadas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al señor Gastón, propietario de la cantera Alonso-Di Ianni, por su gran predisposición y por facilitar el ingreso a la misma las veces necesarias para poder llevar a cabo las tareas de campo correspondientes, como así también al Prof. Daniel Ariztegui (Department of Earth Sciences, University of Geneva) por

facilitarnos el uso del GPS diferencial. La revisión realizada por Erika Sofía Upegui y Carlos Hermann ayudaron a mejorar sustancialmente la calidad del mismo.

## REFERENCIAS

- Anders, N., Valente, J., Masselink, R. y Keesstra, S. 2019. Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Drones* 3(3): 61.
- Bangen, S. G., Wheaton, J. M., Bouwes, N., Bouwes, B. y Jordan, C. 2014. A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers. *Geomorphology* 206: 343-361.
- Bilmes, A., D'Elia, L., Lopez, L., Richiano, S., Varela, A., Álvarez, M., Bucher, J., Eymard, I., Muravchik, M., Franzese, J. y Ariztegui, D. 2019. Digital outcrop modelling using "structure-from-motion" photogrammetry: Acquisition strategies, validation and interpretations to different sedimentary environments. *Journal of South American Earth Sciences* 96, 102325.
- Brasington, J., Langham, J. y Rumsby, B. 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology* 53 (3-4): 299-316.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W. y Quincey, D. J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. Wiley-Blackwell, 197 p. Oxford, United Kingdom.
- Clapuyt, F., Vanacker, V. y Van Oost, K. 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology* 260: 4-15.
- D'Elia, L., Bilmes, A., García, M., Bucher, J., López, M., Feo, R. y Franzese, J. 2021. Análisis Estructural y Tectono-Estratigráfico a partir de afloramientos virtuales y métodos tradicionales de campo de los depósitos sinorogénicos miocenos (Formación La Pava) en el sector norte del antepaís fragmentado patagónico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78(1).
- 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.
- Furukawa, Y. y Ponce, J. 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32: 1362-1376.
- Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60: 91-110.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R. y Ordóñez, C. 2018. Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing* 10(10): 1606.
- Snaveley, N., Seitz, S. M. y Szeliski, R. 2006. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics* 25(3): 835-846.

- Snaveley, N., Seitz, S. M. y Szeliski, R. 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision* 80(2): 189-210.
- Tonkin, T. N., Midgley, N. G., Graham, D. J. y Labadz, J. C. 2014. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology* 226: 35-43.
- 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.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X. y Yan, G. 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing* 8(6): 501.