

# Modelado geológico 3D a canteras históricas. La cantera de la isla de Nueva Tabarca (Alicante)

*3D geological modelling of historical quarries. The Nueva Tabarca island quarry (Alicante, Spain)*

Iván Martín-Rojas<sup>1</sup>, Javier Martínez-Martínez<sup>1,2</sup>, Hugo Corbí<sup>1</sup>, José Francisco Baeza-Carratalá<sup>1</sup> y Alice Giannetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante. Campus San Vicente del Raspeig. 03690 San Vicente del Raspeig (Alicante, Spain).  
ivan.martin@ua.es

<sup>2</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (Spain)  
javier.martinez@igme.es

## ABSTRACT

*This paper presents the workflow implemented to build a high resolution, 3D, geological model of the Nueva Tabarca Island historical quarry. This 3D model could be the main input for potential restoration by replacement of the deeply weathered stones in the baroque monuments of the island. The workflow starts with the construction of a photogrammetric model, that yielded a point cloud. This cloud is the basis for a detailed geological field analysis including a recognition of stratigraphic units and a structural characterization. The first step in the 3D geological model construction is to build surfaces by krigging interpolation of lines previously traced in 49 cross sections. These surfaces represent the contacts between the geological units, the original reconstructed topographic surface of the quarry (before stone extraction) and the surface of potential limit of extraction (present sea level). From these surfaces, geovolumes of extracted and remaining rock volumes are built. The extracted material was 22.6% of U3, 66.5% of U4, and 10.9% of U5. The remaining material is 61.3% of U3, ca. 42% of U4 and 0.5% of U5.*

**Key-words:** Photogrammetry, monuments restoration, three-dimensional modeling, Miocene.

## RESUMEN

*En este trabajo presentamos la metodología implementada para realizar un modelo geológico de alta resolución 3D de la cantera histórica de la isla de Nueva Tabarca, con el objetivo de que pueda servir de base para una potencial restauración de la villa barroca de la isla por sustitución de los bloques alterados. La metodología implica la creación de un modelo fotogramétrico que dio lugar a una nube de puntos. Dicho modelo es la base sobre la que se lleva a cabo un estudio geológico de campo detallado, que incluye una definición de unidades estratigráficas y una caracterización estructural. Con este conjunto de datos, el modelo geológico 3D comienza con la construcción de superficies mediante interpolación por krigging de las líneas trazadas en 49 cortes geológicos. Las superficies generadas incluyen los contactos entre unidades estratigráficas, la superficie topográfica original de la cantera (previa a la extracción) y la superficie límite de extracción potencial (marcada por el nivel del mar actual). Una vez obtenidas las superficies, éstas hacen de límites para la construcción de geovolumenes de material extraído y remanente de cada unidad aflorante. Del total extraído el 22.6% correspondía a la unidad U3, el 66,5% a la U4, el 10,9% a la U5. Los porcentajes de material remanente son 61,3% de U3, ca. 42% de U4 y 0,5% de U5.*

**Palabras clave:** Fotogrametría, restauración de monumentos, modelado tridimensional, Mioceno.

*Geogaceta*, 63 (2018), 67-70  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 23 de junio de 2017  
Revisión: 9 de octubre 2017  
Aceptación: 23 de octubre 2017

## Introducción

La restauración de monumentos pétreos implica en muchas ocasiones la sustitución de las partes más alteradas por nuevos bloques de roca. En esos casos, es necesario utilizar los materiales de sustitución adecuados, con las mismas características físicas y estéticas (Sasse y Sneathlage, 1996; Graue *et al.*, 2011 entre otros). Lo más conveniente es que los nuevos bloques de roca provengan de la misma cantera que los originales (Pereira y

Marker, 2016). Sin embargo, la mera localización de la cantera histórica de procedencia no es suficiente, ya que las características de la roca pueden variar dentro de la propia cantera. Por ello, con el objetivo de que la tarea de restauración sea realmente efectiva, es muy importante caracterizar de la forma más precisa posible la geometría y distribución de los cuerpos de roca en las canteras históricas. En este sentido las nuevas técnicas fotogramétricas pueden ser una herramienta de gran utilidad, ya que, combinadas con el trabajo

geológico tradicional, permiten llevar a cabo una modelización geométrica 3D de alta resolución, en la que queden reflejadas las variaciones espaciales del macizo rocoso.

La cantera histórica de la isla de Nueva Tabarca (Fig. 1) es ideal para llevar a cabo una caracterización 3D de alta resolución, debido a las variaciones litológicas que en ella se observan. Esta cantera suministró los materiales empleados en la construcción de la villa fortificada de la isla, una ciudad barroca construida a lo largo de la segunda mitad del siglo XVIII. Muchos de

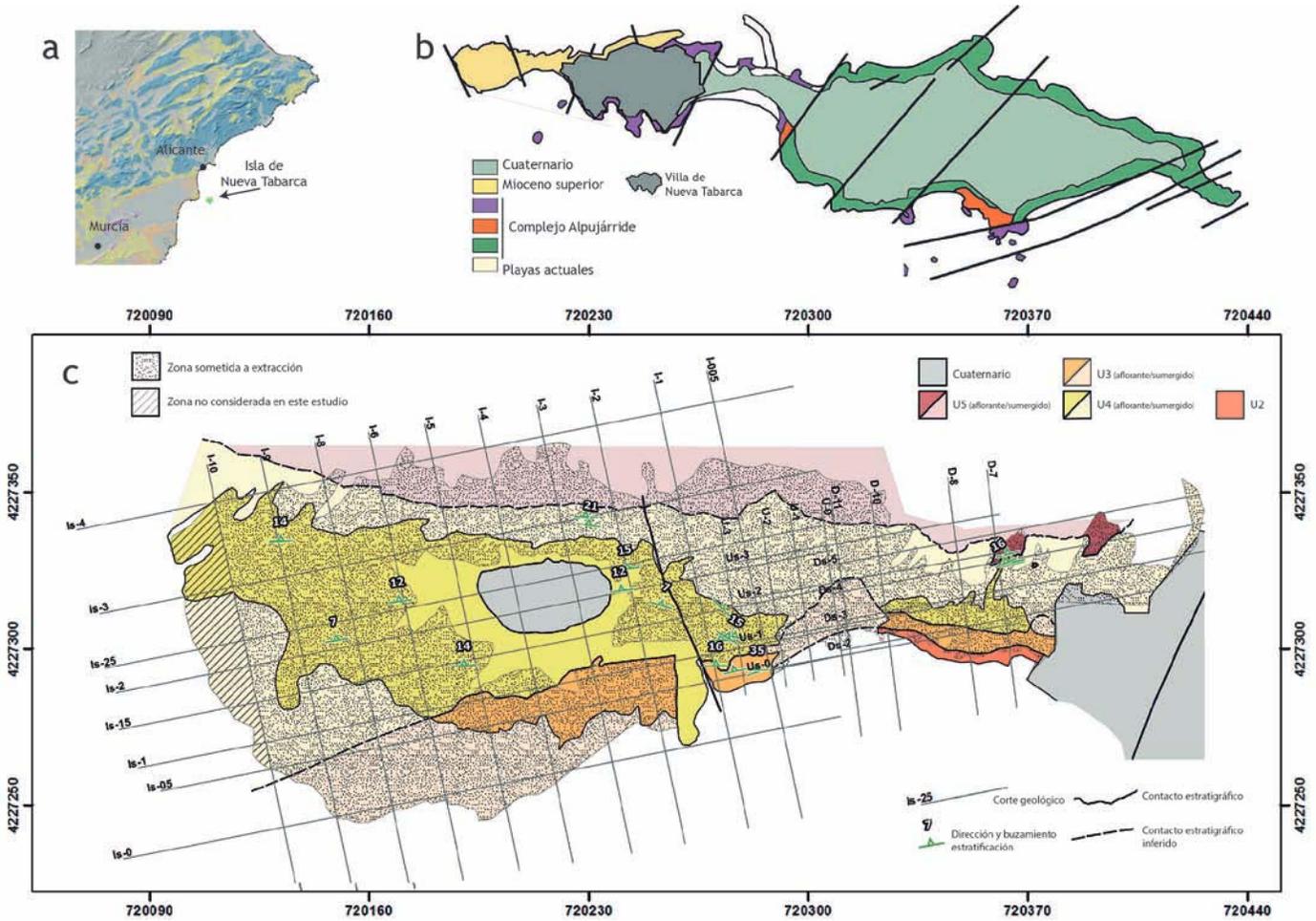


Fig. 1.- a) Situación de la isla de Nueva Tabarca. b) Mapa geológico general de la isla (tomado de Estévez *et al.*, 1985). c) Mapa geológico detallado de la cantera histórica. Los números del recuadro indican las coordenadas (ETRS89, UTM, zona 30N). Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- a) Location of the Nueva Tabarca island. b) Geological map of the island (after Estévez *et al.*, 1985). c) Detailed geological map of the historical quarry. Numbers indicate UTM coordinates (ETRS89, Zone 30N). See color figure in the web.

sus monumentos necesitan ser restaurados, ya que el estado de conservación de la muralla y muchos de los edificios es alarmante, debido a la erosión provocada por la cristalización de sales, la abrasión eólica y la acción del hombre (Martínez-Martínez *et al.*, 2017).

El objetivo de esta comunicación es presentar una caracterización geológica 3D de la cantera histórica de la isla de Nueva Tabarca, a partir de un modelado fotogramétrico combinado con un análisis geológico. Esta caracterización permitirá cuantificar los volúmenes extraídos y que quedan por extraer de los distintos conjuntos diferenciados; datos que podrían ser la base para una potencial restauración mediante la sustitución de los bloques dañados.

### Geología de la isla de Nueva Tabarca

La Isla de Nueva Tabarca se sitúa en la terminación nor-oriental de las Zonas Inter-

nas Béticas (Fig. 1). En ella afloran rocas metamórficas del Complejo Alpujarride sobre las que se sitúan depósitos discordantes del Mioceno Superior y del Cuaternario (Estévez *et al.*, 1985).

En este estudio nos centramos en los materiales del Mioceno Superior, ya que fueron los que se explotaron en la cantera histórica para la construcción de la villa. Se levantaron tres columnas estratigráficas parciales que permitieron establecer una columna sintética con cinco unidades litoestratigráficas: U1, brechas y microconglomerados. U2, calcarenitas con algas rodofíceas. U3, litoarenitas. U4, calcarenitas con intercalaciones de biocalciruditas y U5, litoarenitas laminadas. El contacto U2-U3 es una discordancia erosiva, por lo que el espesor de U3 varía notablemente en las distintas zonas de la isla. El contacto U3-U4 en la zona de la cantera es una discordancia angular, con un ángulo de discordancia de unos 10°. Todas las unidades aflorantes en

el sector de la cantera buzan ligeramente hacia al norte (Fig. 1); si bien el buzamiento disminuye de sur a norte, describiendo un sinforme muy suave y abierto.

### Modelado 3D

Para generar un modelo geológico geométrico 3D de alta resolución de la cantera histórica se comenzó por elaborar un modelo fotogramétrico. Para ello se tomaron 997 fotografías desde un dron Phantom III Advanced, equipado con una cámara de 12 megapíxeles y una lente de 20 mm (equivalencia a 35 mm *full frame*), con una unidad GPS que registra la posición de la imagen y un dispositivo que almacena la inclinación de la cámara. La mayoría de las imágenes se tomaron con la cámara en una posición ortogonal a la superficie, con un solape de entre el 60 y el 70% y en tres vuelos a diferentes alturas (ca. 5, 10 y 30 m; *e.g.*, Abdullah *et al.*, 2013; Micheletti *et al.*, 2015).

Además, también se tomaron 15 imágenes con la vista inclinada, con el objetivo de mitigar el efecto bóveda (James y Robson, 2014). El modelo fotogramétrico se generó con el procedimiento estándar del software Agisoft Photoscan© para la construcción de modelos digitales de elevaciones sin puntos de control. El software consiguió alinear 908 fotografías de las que se obtuvo una nube de puntos dispersa. A partir de ella se obtuvo una nube de puntos densificada con un total de 25,1 millones de puntos y un espaciado medio de 0,02 m, que constituye el modelo fotogramétrico final. Dicho modelo fue georeferenciado a partir de los datos de posición y orientación almacenados en las imágenes tomadas y evaluado usando el MDT con paso de malla medio de 0,5 m disponible en la Comunidad Valenciana.

El siguiente paso fue la elaboración de una cartografía geológica detallada de la cantera (Fig. 1), en la que se trazaron los contactos de las unidades aflorantes. También se tomaron numerosos datos de orientación de la estratificación. Tanto la cartografía como la toma de datos de orientaciones se realizaron con la aplicación Field Move©, instalada en un dispositivo electrónico, que permite la obtención de datos directamente georeferenciados con una precisión suficiente para nuestros fines.

Para la elaboración del modelo geológico 3D se introdujeron todos los datos geológicos y el modelo fotogramétrico en el software Move©. En Move© se trazaron y digitalizaron un total de 49 cortes geológicos del área de la cantera (28 perpendiculares y 21 paralelos a la dirección estructural

principal, Fig. 1). A partir de esos cortes se construyeron las superficies de estratificación mediante la interpolación por *kriging* ordinario, con un paso de malla de 0,5 m de los nodos de las líneas que representan a las capas (Fig. 2a).

Dado que el objetivo era el de calcular los volúmenes extraídos y remanentes de cada unidad, se generó una superficie que representara la topografía original de la cantera antes de la extracción. Esa superficie original se reconstruyó en 2D en los 42 cortes en los que se pudo reconocer algún resto de la misma, interpolando visualmente los restos que se conservan (Fig. 2). También se utilizó como fuente de información para la reconstrucción el trazado de la línea de costa, obtenido a partir de un mapa histórico de la isla. La superficie en

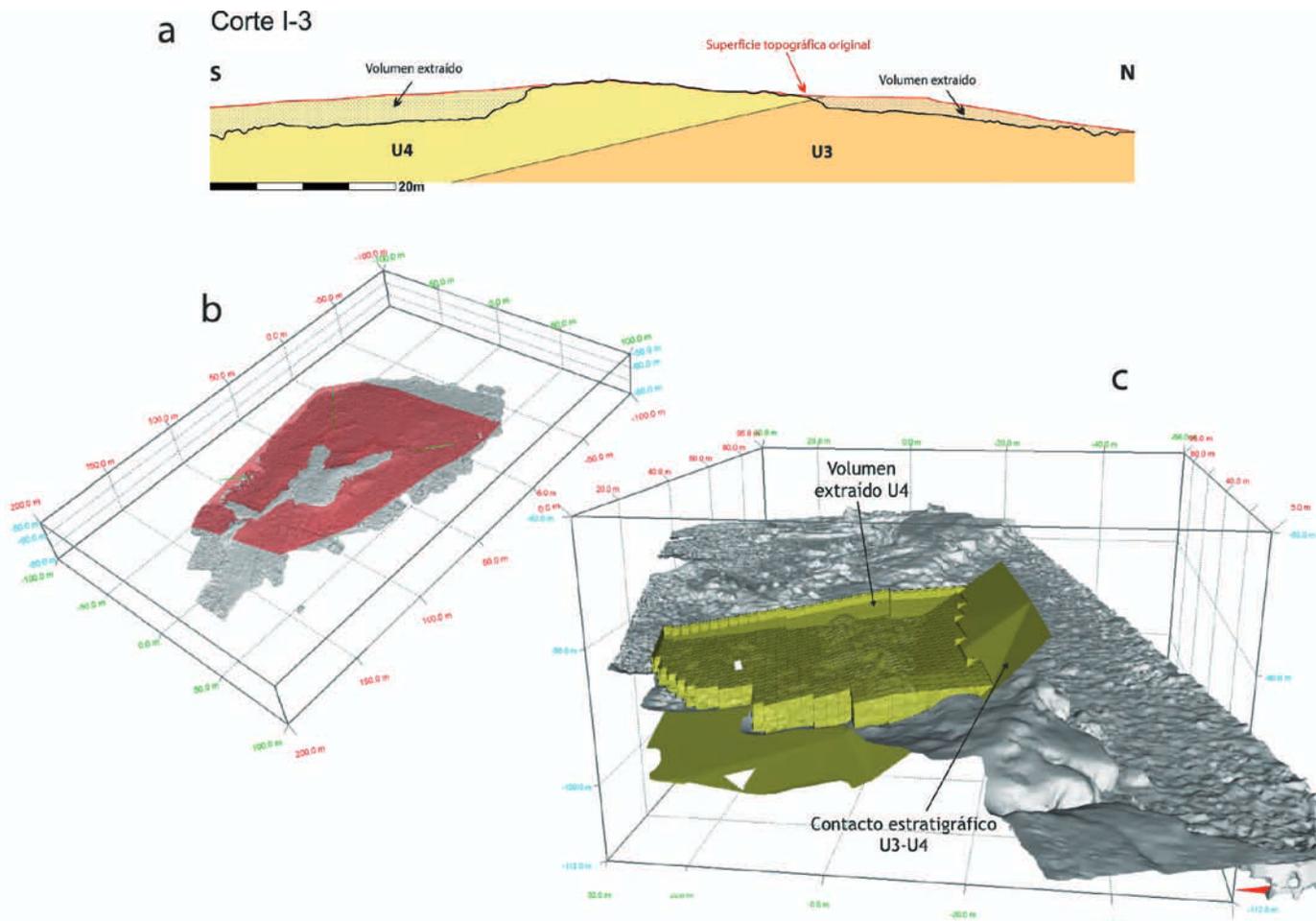


Fig. 2.- a) Ejemplo de corte geológico utilizado para la reconstrucción de la superficie topográfica original y para la construcción del modelo geológico 3D (localización en Fig. 1). La línea roja representa la traza de la superficie topográfica original reconstruida mediante interpolación visual de los restos de la misma reconocibles actualmente. b) Vista 3D de la superficie topográfica original reconstruida de la cantera histórica. c) Ejemplo de geovolumen reconstruido. La superficie amarilla representa el contacto estratigráfico entre las unidades U3 y U4. Las líneas grises que se observan en el geovolumen representan los tetraedros de 1 m utilizados para su reconstrucción. La superficie gris representa la superficie topográfica actual obtenida del modelo fotogramétrico. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- a) Example of geological cross section used to reconstruct the original topographic surface and the 3D geological model (location in Fig. 1). The red line represents the trace of the original topographic surface reconstructed by visual interpolation of the recognised remains. b) 3D view of the reconstructed original topographic surface. c) Example of reconstructed geovolume. The yellow surface represents the contact between units U3 and U4. Grey lines within the geovolume indicate the 1m tetrahedra used for geovolume construction. The grey surface represents the present topography after the photogrammetric model. See color figure in the web.

sí fue interpolada a partir de las líneas por *krigging*, siguiendo los mismos parámetros antes mencionados. Obviamente, este método implica que muchas de las irregularidades que posiblemente existían no pueden ser reproducidas, por lo que la superficie obtenida es sólo una aproximación. Además, en algunos casos, no ha sido posible dirimir si un elemento topográfico concreto observado en el modelo fotogramétrico pertenecía o no a la superficie original, lo que aumenta la incertidumbre; en esos casos optamos por proyectar cilíndricamente la superficie interpolada usando una malla uniforme.

Para calcular los volúmenes remanentes, se generó una última superficie que representa el límite máximo de extracción. Este límite viene impuesto por la posición del nivel del mar, ya que consideramos que por debajo de dicho nivel no es posible (o sería mucho más costoso) extraer bloques. Esta superficie fue generada por interpolación mediante *krigging* de los puntos correspondientes a la superficie del mar, previamente extraídos de forma visual del modelo fotogramétrico.

Por último, se generaron geovolúmenes, es decir cuerpos 3D que representan los volúmenes de roca extraídos y remanentes de cada unidad aflorante (Fig. 2). Para crear estos geovolúmenes se utilizó la herramienta incluida en Move *Create tetra-volume between horizons*, tomando como tamaño de celda (de tetraedro) 1m y usando como superficies limitantes las superficies de estratificación interpoladas, la superficie topográfica original reconstruida, la superficie que representa el nivel del mar y la superficie topográfica actual obtenida del modelo fotogramétrico.

## Cuantificación de volúmenes

A la hora calcular los volúmenes extraídos y remanentes tuvimos en cuenta que, dado que los geovolúmenes generados tienen un tamaño de celda (de tetraedro) de 1 m, los volúmenes implican un error po-

tencial de  $\pm 1 \text{ m}^3$  por cada tetraedro adyacente a las superficies limitantes; de ese modo los valores calculados presentan un error intrínseco máximo igual al resultado de multiplicar la suma total de sus superficies limitantes por  $2 \text{ m}^3$ . No pudieron ser considerados los errores descritos en el apartado anterior derivados de las inexactitudes a la hora de interpolar las superficies limitantes (sobre todo la superficie topográfica original).

En las zonas en las que se extrajo el material en la cantera histórica de la isla de Nueva Tabarca sólo afloran las unidades U3, U4 y U5. Nuestros cálculos indican que en total se extrajeron  $36269 \pm 2160 \text{ m}^3$  de roca, de los cuales el 22,6% correspondía a la unidad U3, el 66,5% a la U4, el 10,9% a la U5 (8198, 24101 y 3970  $\text{m}^3$  respectivamente). Por lo que respecta al volumen remanente, nuestros resultados indican que aún sería posible extraer  $61634 \pm 1980 \text{ m}^3$  de roca; de los cuales el 57,5% serían de la unidad U3, en torno al 42% de U4 y sólo un 0,5% de U5.

## Conclusiones

Como ya es sabido, el uso combinado de estudios geológicos detallados junto con modelos fotogramétricos de alta resolución permite la elaboración de modelos geológicos 3D. El ejemplo aquí presentado para la isla de Nueva Tabarca muestra como este tipo de análisis pueden ser aplicados a canteras históricas, en las cuales resulta especialmente importante establecer de forma cuantitativa las variaciones espaciales de las distintas características litológicas del material extraído o por extraer. Los datos así obtenidos podrían, por ejemplo, servir para establecer la zona concreta de extracción dentro de la cantera del material usado en un monumento concreto. También podrían utilizarse para establecer posibles estrategias de extracción a la hora de planificar restauraciones de monumentos degradados mediante la sustitución de bloques de roca.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Universidad de Alicante (GRE12-03, GRE14-05 y VIGROB053), así como por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER (UE) en el marco del proyecto EPILATES (CGL2015-65602-R). Agradecemos las revisiones de Antonio Abellán y Miguel Gómez Heras, que han mejorado significativamente la calidad del manuscrito original. Los modelos geológicos 3D fueron creados con el software Move de Midland Valley, gracias a una licencia académica del mismo.

## Referencias

- Abdullah, Q., Bethel, J., Hussain, M. y Munjy, R. (2013). En: *Manual of Photogrammetry* (McGlone, J.C., Ed.). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1187–1220.
- Estévez, A., Pina, J.A., Cáliz, F., y Hervás, J.L. (1985). *Isla Plana o Nueva Tabarca: Significación geológica y evolución tectónica reciente en el contexto del sector oriental de las Cordilleras Béticas*. En: *La reserva marina de la Isla Plana o Nueva Tabarca (Alicante)* 25-35.
- Graue, B., Siegesmund, S., Middendorf, B. (2011). *Environmental Earth Sciences* 63, 1799-1822.
- James, M.R. y Robson, S. (2014). *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1413–1420.
- Martínez-Martínez, J., Corbí, H., Martín-Rojas, I., Baeza-Carratalá, J.F. y Giannetti, A. (2017). *Engineering Geology* 231, 88-99.
- Micheletti, N., Chandler, J.H. y Lane, S.N. (2015). En: *Geomorphological Techniques* (L.E. Clarke y J.M. Nield, Eds.). London: British Society for Geomorphology. Chap. 2, Sec. 2.2.
- Pereira, D. y Marker, B. (2016). *Geosciences* 6 (13): 1-9
- Sasse, H.S. y Snethlage, R. (1996). En: *Report of Dahlem Workshop on Saving our Architectural Heritage* (N.S. Baer y R. Snethlage, Eds.). 223-243.