

RED DE MONITORIZACIÓN FOTOGRAMÉTRICA PARA EL SEGUIMIENTO DE PROCESOS EROSIVOS EN EL TAJO DE SAN PEDRO (GRANADA)

PHOTOGRAMMETRIC MONITORING NETWORK FOR EROSION
PROCESSES IN TAJO DE SAN PEDRO, GRANADA

MARTA GUINAU SELLÉS

*Grupo de Investigación RISKINAT. Dpto. Dinámica de la Tierra y del Océano.
Facultad de Ciencias de la Tierra. Universitat de Barcelona*

mguinau@ub.edu

XABIER BLANCH GÓRRIZ

Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. Technische Universität Dresden

xabier.blanch@tu-dresden.de

ANTONIO ABELLÁN FERNÁNDEZ

Center for Research on the Alpine Environment (CREALP). Sion (Valais, Suiza)

antonio.abellan@crealp.vs.ch

JOSÉ MIGUEL AZAÑÓN HERNÁNDEZ

Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada

jazanon@ugr.es

RESUMEN: La situación del complejo arquitectónico de la Alhambra cercano al tajo de San Pedro, ubicado en la ladera norte de la colina de la Sabika, y los procesos erosivos que lo afectan, confieren una situación de riesgo importante. Desde hace unos años el Patronato de la Alhambra y Generalife está impulsando diversos estudios para abordar la monitorización de estos procesos para poder diseñar medidas de protección adecuadas. Las técnicas actualmente más utilizadas para abordar este tipo de estudios en paredes con una alta frecuencia de desprendimientos son el LiDAR y la fotogrametría digital. Dada la alta frecuencia de los procesos que afectan el escarpe en cuestión, se ha desarrollado una red de sistemas fotogramétricos para el análisis multitemporal de estos procesos erosivos. En este artículo se describe el diseño e implementación de los sistemas fotogramétricos que forman esta red y de sus componentes, así como los resultados obtenidos después de dos años de monitorización. Las imágenes digitales obtenidas a partir de estos sistemas permiten obtener modelos 3D del escarpe. La comparación multitemporal de estos, mediante procesos de análisis específicos para el tratamiento de datos tridimensionales, permite identificar los desprendimientos ocurridos en el escarpe y caracterizar su actividad. Los trescientos treinta y cinco desprendimientos detectados en el período analizado (seiscientos sesenta y nueve días) indican la gran actividad de la pared. La obtención de curvas de Magnitud-Frecuencia (M-F) permite caracterizar la dinámica de estos procesos y aportar datos relevantes para el diseño de medidas de protección.

PALABRAS CLAVE: Desprendimientos, fotogrametría, Structure from Motion, Multi-view stereo, modelos 3D.

ABSTRACT: The location of the Alhambra architectural complex near the tajo de San Pedro, located on the northern slope of the Sabika Hill, and the erosion processes that affect it, pose a significant risk. For some years now, the Patronato de la Alhambra y Generalife has been promoting various studies to monitor these processes and design appropriate protective measures. The techniques currently most used to conduct this type of study on cliffs with a high frequency of rockfalls are LiDAR and digital photogrammetry. Given the high frequency of the processes that affect the escarpment in question, a photogrammetric monitoring network has been developed for the multi-temporal analysis of these processes. This paper describes the design and implementation of the photogrammetric systems that form this network and its components, as well as the results obtained after two years of monitoring. The digital images obtained from these systems allow for the creation of 3D models of the escarpment. The multi-temporal comparison of these models, using specific analysis processes for the treatment of three-dimensional data, permits to identify the landslides that have occurred on the escarpment and characterise their activity. The three hundred thirty-five landslides detected in the analysed period (six hundred sixty-nine days) indicate the significant activity of the cliff. Obtaining Frequency-Magnitude curves allows us to characterise the dynamics of these processes and provide relevant data for the design of protective measures.

KEYWORDS: Rockfall, monitoring, photogrammetry, structure from motion, multi-view stereo, 3D models.

CÓMO CITAR | HOW TO CITE: GUINAU SELLÉS, Marta; BLANCH GÓRRIZ, Xabier; ABELLÁN FERNÁNDEZ, Antonio; AZAÑÓN HERNÁNDEZ, José Miguel. «Red de monitorización fotogramétrica para el seguimiento de procesos erosivos en el tajo de San Pedro (Granada)». *Cuadernos de la Alhambra*, 52 (2023), pp. 53-70. e-ISSN 2695-379X.

INTRODUCCIÓN

SITUACIÓN Y PROBLEMÁTICA DEL TAJO DE SAN PEDRO

El complejo arquitectónico de la Alhambra y el Generalife (Granada, España), declarado Patrimonio Mundial por la UNESCO en 1984, se encuentra construido en la cima de la colina de la Sabika con 790 m de altitud sobre el nivel del mar. La ladera norte de esta colina, con el río Darro en sus pies, alberga el denominado tajo de San Pedro, un escarpe en forma de diedro de 65,5 m de altura, situado en frente de la iglesia de San Pedro, que conforma una de las vistas más características de la Alhambra [ilustración 1].

Si bien el origen de este acantilado es incierto, su formación y evolución en el tiempo están fuertemente relacionadas con la ocurrencia de procesos erosivos y desprendimientos producidos como consecuencia de:

1. La erosión y socavación en la base del tajo producida por el río Darro.
2. Movimientos sísmicos.
3. Erosión producida por el agua de lluvia y su infiltración¹.

La colina de la Sabika está formada por conglomerados de la «formación Alhambra», pertenecientes a sedimentos aluviales provenientes de la erosión de Sierra Nevada y depositados en abanicos aluviales formados durante el Plioceno Superior y el Pleistoceno Inferior (3,6-1,8 Ma). Estos se caracterizan por ser altamente resistentes a la compresión, pero fácilmente ripables. En el tajo de San Pedro, los conglomerados de la «formación Alhambra» presentan algunos niveles de limos y de arenas intercalados, y un nivel de paleosuelos pleistocenos, con una estratificación sub-horizontal². En el frente del escarpe se observa también la presencia de diversas fallas, una de las cuales, con un salto de 3,5 m, coincide con la arista del diedro que conforma el tajo de San Pedro³.

La presencia de las edificaciones de la Alhambra cercanas al acantilado (a 21,5 m), y los evidentes procesos erosivos que causan su retroceso confieren una situación de riesgo geológico preocupante, tanto para los más de seis millones de turistas que

visitan anualmente el sitio, como para la preservación y conservación del complejo arquitectónico. El único estudio científico sobre los procesos erosivos que afectan al tajo de San Pedro es el trabajo desarrollado por Xabier Blanch Górriz⁴, cuyos resultados preliminares apuntan que la erosión está dominada principalmente por mecanismos de desprendimiento, aunque no se descarta que bloques de mayor tamaño puedan presentar mecanismos de tipo vuelco que rápidamente evolucionen a desprendimientos⁵. Recientemente, también se ha empezado a analizar una hipótesis de trabajo que indica que los desprendimientos pueden estar controlados por la degradación del cemento carbonático que fija los cantos del conglomerado de la «formación Alhambra» y por la apertura de grietas de tensión sub-paralelas al escarpe, que delimitan los bloques. En esta línea, el Patronato de la Alhambra y Generalife (PAG) ha empezado los estudios pertinentes para probar la eficacia de las soluciones propuestas en base a esta hipótesis.

MONITORIZACIÓN DEL TAJO DE SAN PEDRO

El estudio de escarpes activos como el tajo de San Pedro se puede abordar desde diferentes perspectivas. Actualmente, las técnicas más usadas y que

1. AZAÑÓN HERNÁNDEZ, José Miguel; RODRÍGUEZ-PECES, Martín Jesús; GARCÍA-MAYORDOMO, Julián; DE JUSTO ALPAÑÉS, José Luis. «Fallas activas y sismicidad en las partes altas de la ciudad de Granada: comportamiento dinámico de la “formación Alhambra”». *4º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 2011, pp. 1-7. DE JUSTO ALPAÑÉS, José Luis; SAURA, Javier; CASTRO-FRESNO, Daniel; AZAÑÓN HERNÁNDEZ, José Miguel; DURAND NEYRA, Percy; MORALES, A.; VÁZQUEZ, N.; JUSTO, E. «Restauración del tajo de San Pedro en la Alhambra de Granada. Aspectos de cálculo». *Informes de la Construcción*, 61, 514 (2009), pp. 81-92. Disponible en: <https://doi.org/10.3989/ic.05.001>.
2. *Ibid.*
3. AZAÑÓN HERNÁNDEZ, J. M.; RODRÍGUEZ-PECES, M. J.; GARCÍA-MAYORDOMO, J.; DE JUSTO ALPAÑÉS, J. L. «Fallas activas y sismicidad»..., *op. cit.* (n. 1), pp. 1-7.
4. BLANCH GÓRRIZ, Xabier. *Developing Advanced Photogrammetric Methods for Automated Rockfall Monitoring*. Tesis doctoral en Xarxa, 2022. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/675397>.
5. HUNGR, O.; LEROUÉIL, S.; PICARELLI, L. «The Varnes classification of landslide types, an update». *Landslides*, 11 (2014), pp. 167-194. Disponible en: <https://doi-org.sire.ub.edu/10.1007/s10346-013-0436-y>.



Ilustración 1. Vista panorámica de la ladera norte de la colina de la Sabika, con del tajo de San Pedro debajo del complejo arquitectónico de la Alhambra. En la parte inferior de la imagen se observan las primeras líneas de edificios del barrio del Albaicín de Granada dispuestos paralelamente al río Darro. Imagen de Mgmelfarb, 2015, en WikimediaCommons (CC BY-SA 4.0).

permiten obtener datos a distancia, sin la necesidad de tomar contacto directo con el escarpe son el LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) y la fotogrametría digital. El LiDAR es una técnica óptica de teledetección que permite obtener datos 3D de un objeto o superficie mediante la emisión y recepción de un haz de luz láser. Esta técnica ha supuesto una considerable mejora en la caracterización geométrica de desprendimientos⁶, por ejemplo, o un incremento en la frecuencia temporal de la monitorización de deslizamientos⁷.

A pesar de sus numerosas ventajas, esta técnica también tiene algunas limitaciones, como el alto coste del dispositivo o de su mantenimiento, la dificultad de su uso en zonas remotas o de difícil acceso o el alto coste para instalaciones fijas⁸. Estas limitaciones condicionan de forma importante el uso del LiDAR para la monitorización de procesos naturales en determinados escenarios que requieran, por ejemplo, una alta frecuencia de monitorización⁹.

Por otro lado, la fotogrametría digital es una técnica de monitorización que permite superar al-

gunas de las limitaciones de la técnica LiDAR. Esta técnica permite la obtención de un modelo o nube

6. ABELLÁN, A.; JABOYEDOFF, M.; OPPIKOFER, T.; VILAPLANA, J. M. «Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 (2009), pp. 365-372. Disponible en: <<https://doi.org/10.5194/nhess-9-365-2009>>.
7. JABOYEDOFF, M.; OPPIKOFER, T.; ABELLÁN, A.; DERRON, M. H.; LOYE, A.; METZGER, R.; PEDRAZZINI, A. «Use of LiDAR in landslide investigations: A review». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 61, 1 (2012), pp. 5-28. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>>.
8. COOK, K. L. «An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection». *Geomorphology*, 278 (2017), pp. 195-208. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009>>.
9. *Ibid.* STURZENEGGER, M.; YAN, M.; STEAD, D.; ELMO, D. «Application and limitations of ground-based laser scanning in rock slope characterization». Proceedings of the 1st Canada US Rock Mechanics Symposium *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, 1 (May 2016), 2017, pp. 29-36. Disponible en: <<https://doi.org/10.1201/noe0415444019-c4>>. WILKINSON, M. W.; JONES, R. R.; WOODS, C. E.; GILMENT, S. R.; MCCAFFREY, K. J. W.; KOKKALAS, S.; LONG, J. J. «A comparison of terrestrial laser scanning and structure

de puntos tridimensional de un objeto o superficie a partir de imágenes digitales, mediante algoritmos Structure from Motion (SfM) y Multi-view stereo (MVS)¹⁰. La posibilidad de crear sistemas de bajo coste, la facilidad de instalar estos sistemas en sitios remotos, juntamente con la posibilidad de obtener resultados con un rápido proceso de aprendizaje de las metodologías de análisis, han llevado a la democratización de esta estrategia de monitorización¹¹.

La preocupación de los gestores del complejo histórico por la evolución del retroceso del tajo de San Pedro y sus posibles efectos para la preservación del mismo, ha llevado al PAG a desarrollar diversos estudios para monitorizar los procesos erosivos que generan el retroceso del escarpe. Uno de estos estudios ha consistido en la monitorización a partir de datos LiDAR para analizar y caracterizar los procesos erosivos. No obstante, dada la alta frecuencia de estos procesos, surgió la necesidad de instalar un sistema de monitorización mediante fotogrametría digital para poder mejorar el análisis de la evolución de estos procesos. Por este motivo, el PAG, recomendado por la Universidad de Granada, decidió ensayar el presente sistema experimental de monitorización fotogramétrica diseñado e implementado por investigadores de la Universitat de Barcelona, la University of Leeds (UK) y la Universidad de Granada, inicialmente, y posteriormente el Center for Research on the Alpine Environment CREALP (Suiza). El equipo de investigadores, tiene más de quince años de experiencia en la monitorización de desprendimientos rocosos con datos LiDAR y fotogramétricos. Durante estos años han desarrollado e implementado procedimientos de análisis innovadores y exclusivos que permiten obtener modelos fotogramétricos con la calidad requerida para el análisis de los procesos erosivos que ocasionan el retroceso del tajo de San Pedro¹². Esta propuesta se desarrolla en el marco de la tesis doctoral de Xavier Blanch Górriz.

CONFIGURACIÓN DE LA RED DE SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS

Para la reconstrucción 3D de un objeto o escena es necesario disponer de diversas imágenes del mismo realizadas simultáneamente desde diferentes puntos de vista y con un cierto solapamiento. Para la

detección de cambios en una superficie se necesitan generar los modelos 3D del antes y el después de los cambios. Por este motivo el uso de sistemas fotogramétricos *time-lapse* con cámara fija permite obtener imágenes siempre desde la misma posición en periodos temporales diferentes. Utilizar cámaras fijas garantiza que el movimiento se produce únicamente en la escena y no en la posición desde donde se toman las imágenes. Esta ventaja permite el uso de flujos de trabajo avanzados que aprovechan la posición invariable de las cámaras para optimizar los resultados aun utilizando un número limitado de imágenes¹³.

from motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition». *Geosphere*, 12, 6 (2016), 1865-1880. Disponible en: <<https://doi.org/10.1130/GES01342.1>>.

10. BULL, F.; NÚÑEZ, M. A.; RODRÍGUEZ, J. J. *Fotogrametría analítica (Primera edición)*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, S.L., 2003. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2099.3/36694>>. JAMES, M. R.; ROBSON, S. «Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application». *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117 (2012), pp. 1-17. Disponible en: <<https://doi.org/10.1029/2011JF002289>>. WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. «Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications». *Geomorphology*, 179 (2012), pp. 300-314. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>>.
11. WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. «Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications». *Geomorphology*, 179 (2012), pp. 300-314. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>>. ELTNER, A.; SOFIA, G. «Structure from motion photogrammetry technique». *Dev. Earth Surf. Process*, 23 (2020), pp. 1-24. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>>.
12. BLANCH GÓRRIZ, X. *Developing Advanced Photogrammetric Methods...*, op. cit. (n. 4). BLANCH GÓRRIZ, Xabier; ABELLÁN FERNÁNDEZ, Antonio; GUINAU SELLÉS, Marta. «Point Cloud Stacking: A Workflow to Enhance 3D Monitoring Capabilities Using Time-Lapse Cameras». *Remote Sensing*, 12, 8 (Basel, 2020), p. 1240. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/rs12081240>>. BLANCH GÓRRIZ, Xabier; ELTNER, Anette; GUINAU SELLÉS, Marta; ABELLÁN FERNÁNDEZ, Antonio. «Multi-Epoch and Multi-Imagery (MEMI) Photogrammetric Workflow for Enhanced Change Detection Using Time-Lapse Cameras». *Remote Sensing*, 13, 8 (Basel, 2021), p. 1460. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/rs13081460>>.
13. BLANCH GÓRRIZ, X.; ABELLÁN FERNÁNDEZ, A.; GUINAU SELLÉS, M. «Point Cloud Stacking: A Workflow to Enhance 3D...», op. cit. (n. 12), p. 1240. BLANCH GÓRRIZ, X.; ELTNER, A.; GUINAU SELLÉS, M.; ABELLÁN FERNÁNDEZ, A. «Multi-

Una red de monitorización fotogramétrica *time-lapse* con cámara fija, consiste en la ubicación de un número limitado de cámaras en diversos puntos frente al objeto/superficie a analizar. Estas ubicaciones deben cumplir una serie de recomendaciones para obtener, de un modo general, una correcta reconstrucción de la geometría de la superficie:

1. Estar situadas a una distancia regular respecto al objeto.
2. Tener una visual de la superficie sin obstáculos.
3. Con un ángulo de incidencia inferior a los 30°.
4. Tener una distribución que permita la obtención de imágenes de cada uno de los puntos a modelizar desde más de tres posiciones diferentes.

Con una primera visita sobre el terreno, realizada entre el 10 y el 13 de febrero de 2019, se determinó la ubicación de cada una de las cámaras y se tomaron los datos necesarios para el diseño de cada uno de los sistemas a instalar. La visita se realizó en el barrio del Albaicín, situado en el cerro de San Cristóbal, frente a la Alhambra y al tajo de San Pedro [il. 2]. El barrio cuenta con diversos edificios históricos de titularidad pública o privada con terrazas, balcones o ventanales con una visual directa al tajo de San Pedro y que permiten la instalación de los sistemas en entornos semi-vigilados. La ubicación de los puntos de monitorización se decidió en función de:

- A. La distancia al tajo de San Pedro.
- B. La orientación.
- C. La distribución de las cámaras frente al tajo.
- D. La posibilidad de instalar cada sistema sin causar alteración en los edificios ni impacto visual.

Siguiendo estas premisas, se establecieron cinco puntos de captura de datos ubicados en los siguientes edificios cercanos al tajo de San Pedro:

1. Torre del convento de Santa Catalina de Siena (convento de Zafra).
2. Museo Arqueológico y Etnológico de Granada.
3. Torre del campanario de la iglesia de San Pedro.

4. Terraza de la iglesia de San Pedro.
5. Escuela Hogar Madre Teresa [il. 2].

Como se puede ver en la ilustración 2, cuatro de los puntos escogidos se encuentran entre la primera y la segunda línea de edificios junto al río Darro alineados con el tajo de San Pedro y a una distancia del escarpe de entre 70 y 100 m. A falta de encontrar una quinta posición en primera línea, con una visión frontal del escarpe y sin obstáculos, se escogió una posición frontal más alejada, situada en un punto elevado, pero a unos 260 m del tajo. Este punto, a pesar de estar más alejado aporta datos complementarios a los sistemas instalados a primera línea, permitiendo obtener una mejor reconstrucción de la escena.

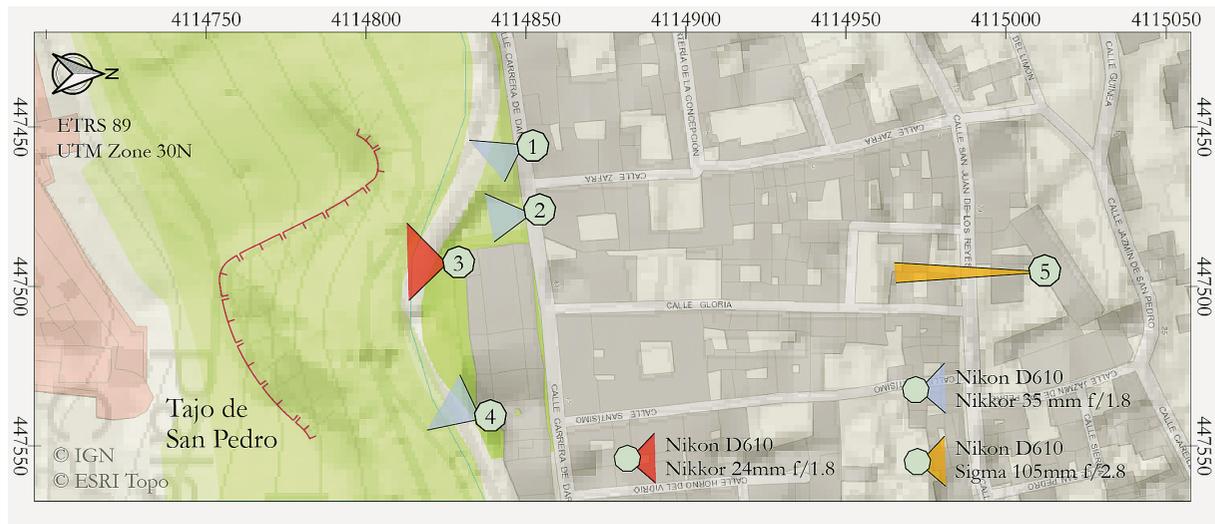
Una vez decididos los puntos de instalación se realizó una primera toma de fotografías desde cada uno de los puntos para realizar las comprobaciones necesarias para validar las ubicaciones y preparar el posterior diseño de cada uno de los sistemas. La instalación de los cinco sistemas se realizó en una segunda campaña realizada entre el 8 y el 13 de julio de 2019. Posteriormente, y tras un primer año de adquisición de datos, se identificaron una serie de limitaciones en el funcionamiento de los sistemas que obligaron a modificar algunos de sus componentes para mejorar su funcionamiento.

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTURA DE IMÁGENES

CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS

Para el diseño de la red de monitorización fotogramétrica se siguieron tres premisas. Los sistemas tenían que ser:

Epoch and Multi-Imagery (MEMI) Photogrammetric Workflow», *op. cit.* (n. 12), p. 1460. KROMER, Ryan; WALTON, Gabe; GRAY, Brian; LATO, Matt; GROUP, Robert. «Development and Optimization of an Automated Fixed-Location Time Lapse Photogrammetric Rock Slope Monitoring System». *Remote Sensing*, 11 (Basel, 2019), p. 1890. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/rs11161890>>.



A



B

Il. 2. A) Mapa con la ubicación de los sistemas fotogramétricos en el barrio del Albaicín de Granada. Mapa base del IGN y ESRI Topo.

B) Simulación 3D de la vista desde el tajo de San Pedro con la ubicación de los sistemas fotogramétricos. Modelo de Google Earth. Fuente: BLANCH GÓRRIZ, Xabier. Tesis doctoral, 2022.

1. Programables, para poder obtener una ráfaga de fotografías *time-lapse* de forma simultánea en los diferentes sistemas (por ejemplo tres imágenes de cada sistema cuatro veces al día), lo que implicó el desarrollo y la programación de una unidad avanzada de control.
2. Con acceso remoto, para que fueran capaces de transmitir la gran cantidad de datos capturados y recibir instrucciones de programación básicas, lo que se consiguió con el desarrollo de una infraestructura de red.
3. Autosuficientes, lo que implicó, en algunos casos, instalar baterías y placas solares como sistema de alimentación eléctrica.

Cumpliendo estas tres premisas, la red de monitorización fotogramétrica diseñada en este trabajo está compuesta de los elementos indicados [figura 1].

Tanto la cámara como la unidad de control de todos los sistemas se han montado en el interior de una caja estanca para asegurar la impermeabilidad y la durabilidad de los sistemas.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS SISTEMAS

En la primera línea de edificios frente al tajo de San Pedro se instalaron dos sistemas. El sistema más cercano al tajo de San Pedro (70 m) y que aporta una vista directa del escarpe, se encuentra en el alféizar de uno de los arcos del último piso de la torre de la iglesia de San Pedro [ubicación 3 en il. 2], construida el año 1567 [il. 3]. Además del sistema fotogramétrico, la torre de la iglesia de San Pedro también alberga parte del sistema de conectividad. Para tal efecto se instaló un módem 4G [il. 4] que emite señal wifi hacia los sistemas instalados en la segunda línea de edificios frente al tajo de San Pedro, permitiendo su conectividad.

El segundo sistema instalado a primera línea, se encuentra en la terraza de la sacristía de San Pedro [ubicación 4 en il. 2], situada en el número 4 de la Carrera del Darro, a unos 85 m de la pared analizada [il. 5].

En la segunda línea de edificios frente al tajo de San Pedro, a unos 100 m de distancia, se instalaron dos

sistemas. Por un lado, el sistema fotogramétrico del convento de Santa Catalina de Siena [ubicación 1 en il. 2] se instaló en el último piso de la torre central que preside el edificio del convento, construido el año 1540 [il. 6]. Por otro lado, la instalación de la cámara en el Museo Arqueológico y Etnológico de Granada [ubicación 2 en il. 2] se realizó en el segundo piso del edificio conocido como la casa de Castril, construida en el año 1940, en el balcón más cercano al convento de Zafra [il. 7]. Aunque la localización de estos sistemas no permite una vista completa del escarpe, su posición justo en frente del tajo permite obtener imágenes de gran calidad en términos fotogramétricos, y hacen que la geometría de la red sea más robusta.

Ambos sistemas disponen de una antena wifi para conectar el sistema con el módem 4G instalado en la torre de la iglesia de San Pedro, situada a escasos metros (25-45 m) y con visual directa, a través del cual se obtiene conexión a internet para la transmisión de los datos.

Finalmente, se instaló un quinto sistema en la Escuela Hogar Madre Teresa [ubicación 5 en il. 2] en la terraza del edificio central de la Escuela, donde no se realiza ninguna actividad y, por ende, la afectación a los usuarios de la Escuela Hogar es nula [il. 8]. Este sistema se encuentra a unos 260 m del tajo de San Pedro.

En los cinco sistemas se usaron cámaras Nikon D610, no obstante, estas se equiparon con objetivos diferentes, adaptados a los requerimientos de cada ubicación. En el sistema de la torre de la iglesia de San Pedro se usó un objetivo Nikkor de 24 mm y f/1.8, en la terraza de la sacristía de San Pedro, del convento y del museo, se usaron objetivos Nikkor de 35 mm y f/1.8, y en la Escuela Hogar se usó un objetivo Sigma de 105 mm y f/2.8.

En los sistemas de la terraza de la sacristía de San Pedro y de la Escuela Hogar, la conectividad para la transmisión de datos se realiza mediante un módem 4G instalado en cada uno de los sistemas en el interior de una caja estanca auxiliar.

La alimentación eléctrica en el convento de Santa Catalina, en la sacristía de San Pedro y en la Escuela Hogar se realiza mediante placas solares

CÁMARA	Sensor fotográfico; Full-frame sensor (43 mm/35 mm analogue film); Digital Single Lens Reflex (DSLR) Nikon D610 Objetivo adaptado a cada ubicación para obtener el campo de visión deseado
UNIDAD DE CONTROL	Placa de microprocesador de Raspberry Pi Foundation Realtime clock and power management; placa de UUGear WittyPi © Relés y/o step-down (interruptores) para regular el paso de corriente a los sistemas
CONECTIVIDAD E INFRAESTRUCTURA DE RED	Receptor y transmisor de red, compuesto por antenas wifi, USB y un módem 4G Servicios de conexión y servidores de red Estación de trabajo para la descarga, procesado y almacenamiento de datos
AUTONOMÍA ENERGÉTICA	Placa solar adaptada a las características de cada sitio y regulador solar Baterías

Figura 1. Componentes principales de los sistemas fotogramétricos.

instaladas de tal manera que su impacto visual sea mínimo. En el caso de la torre de la iglesia de San Pedro y del Museo, debido a la imposibilidad de instalar placas solares en elementos exteriores de los edificios, los sistemas se han conectado a la red eléctrica de 220V propia de los edificios.

Para minimizar el impacto visual, se han buscado ubicaciones fuera del alcance visual desde la calle y, en caso de que esto no fuera posible, se han pintado las cajas estancas y las antenas del mismo color que la fachada de los edificios haciendo prácticamente nula su visualización desde la calle [ils. 3 y 4].

DISEÑO DE LA RED DE MONITORIZACIÓN

Todos los sistemas descritos anteriormente, junto con los códigos y librerías que han permitido su programación, conforman una red de monitorización que permite la adquisición multi temporal automática de imágenes simultáneamente desde

los cinco sistemas instalados frente al tajo de San Pedro.

Dada la orientación hacia el norte y el noroeste del diedro que conforma dicho escarpe, los sistemas están programados para capturar cinco imágenes en cuatro horas diferentes del día, con el objetivo de capturar imágenes con la mejor iluminación, teniendo en cuenta las variaciones en la dirección e inclinación de la incidencia solar a lo largo del año. En «Fixed photogrammetric systems for natural hazard monitoring with high spatio-temporal resolution», se exponen los aspectos científico-técnicos del sistema con mayor detalle¹⁴.

14. BLANCH GÓRRIZ, Xabier; GUINAU SELLÉS, Marta; ELTNER, Anette; ABELLÁN FERNÁNDEZ, Antonio. «Fixed photogrammetric systems for natural hazard monitoring with high spatio-temporal resolution». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 10 (2023), pp. 3285-3303. Disponible en: <<https://doi.org/10.5194/nhess-23-3285-2023>>.

Il. 3. Sistema instalado en la torre de la iglesia de San Pedro:

A) Campo de visión del sistema sobre el tajo de San Pedro con un objetivo con distancia focal de 24 mm.

B) Sistema instalado en el alfeizar del arco superior izquierdo de la torre, protegido por la malla de protección del arco.

C) Detalle del sistema mimetizado con el color de la pared.

D-E) Detalle de la conexión del sistema y el módem a la red eléctrica de las campanas de la torre.



Il. 4. Detalle del módem 4G instalado en el alfeizar de uno de los arcos de la torre de San Pedro.

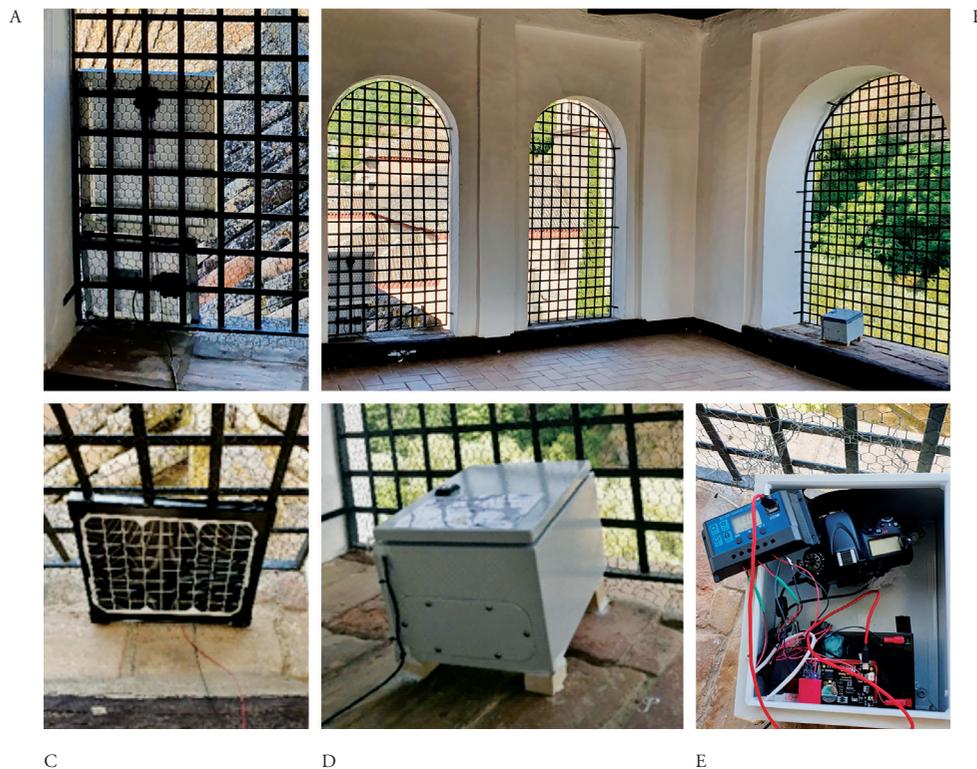


Il. 5. Sistema instalado en la terraza de la sacristía de San Pedro:

A) Vista de Google Earth de la terraza de la sacristía de San Pedro con la ubicación del sistema (cuadro negro).

B) Detalle del sistema anclado en la pared lateral del cobertizo, placas solares apoyadas sobre el cobertizo inferior y caja auxiliar para la batería. Encima del sistema, caja con el módem 4G.

C) Vista de la caja del sistema frente al tajo de San Pedro con la torre del homajaje encima.



Il. 6. Sistema instalado en la torre del convento de Santa Catalina de Siena:

A) Detalle de las dos placas solares desde el interior de la torre.

B) Vista del interior de la torre con la caja-estanca del sistema en el arco de la derecha y las placas solares en el de la izquierda.

C) Detalle de una de las placas solares mimetizada con la reja del arco.

D) Detalle de la caja estanca.

E) Interior de la caja estanca con el sistema (cámara, unidad de control, regulador solar y batería).



A



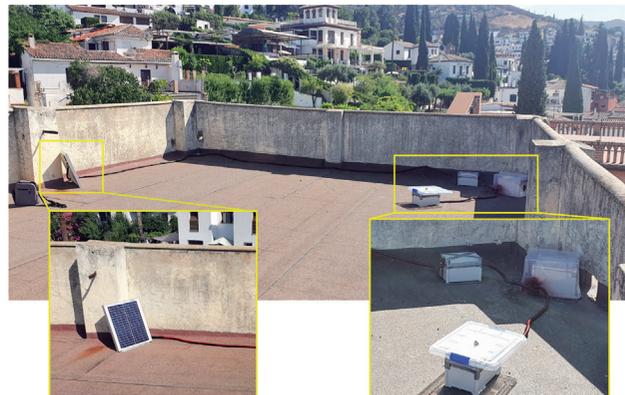
B



C



A



B

Il. 7. Sistema instalado en el Museo Arqueológico y Etnológico de Granada:

A) Vista de la fachada principal del museo con el sistema instalado en el balcón superior izquierdo.

B) Detalle de la vista del balcón con el sistema instalado en el alfeizar encajado entre la barandilla y la puerta del balcón.

C) Detalle del sistema frente al tajo de San Pedro y a la iglesia de San Pedro.

Il. 8. Sistema instalado en la terraza del edificio central de la Escuela Hogar Madre Teresa:

A) Ubicación de la terraza del edificio central de la Escuela hogar Madre Teresa.

B) Imagen general del sistema instalado, con detalle de la placa solar y de las cajas estancas con la cámara, la batería y el módem 4G.

RESULTADOS OBTENIDOS

OBTENCIÓN DE LOS MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS

Los modelos fotogramétricos se realizan a partir de las imágenes del tajo de San Pedro capturadas por cada uno de los sistemas fotogramétricos, mediante el programa Agisoft Metashape Pro y el flujo de trabajo específico denominado Multi-Epoch and Multi-Imagery (MEMI) desarrollado por Xabier Blanch y otros autores, específicamente para la monitorización de este tipo de escarpes¹⁵. Este flujo de trabajo permite mejorar de manera notable los resultados de la comparación multitemporal de los modelos fotogramétricos obtenidos respecto al procesado habitual. La aplicación de estos procesos permite obtener nubes de puntos tridimensionales de la pared analizada en diferentes lapsos temporales, y, mediante su comparación, detectar cambios de orden centimétrico, precisión que sería imposible alcanzar teniendo en cuenta que únicamente se dispone de imágenes adquiridas desde cinco posiciones y con una distribución (distancia y ángulo de visión de la pared analizada) muy restringida. Con los sistemas instalados obtenemos un GSD (Ground Sampling Distance) de aproximadamente 1,5 cm/píxel. Las nubes de puntos obtenidas tienen unos diez millones de puntos y una densidad de 8 000 puntos/m². En el siguiente enlace (<https://skfb.ly/o7QEX>) se puede visualizar una de las nubes de puntos del tajo de San Pedro obtenidas en este estudio.

IDENTIFICACIÓN DE DESPRENDIMIENTOS Y CÁLCULO DE SU VOLUMEN

Una vez obtenidos los modelos fotogramétricos (nubes de puntos tridimensionales) estos se han escalado utilizando una nube de puntos LiDAR del tajo de San Pedro obtenida el año 2019.

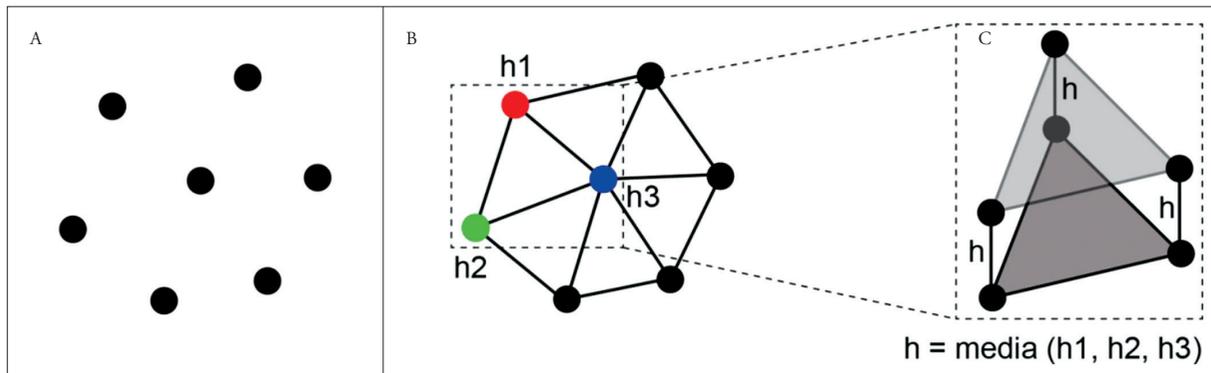
Una vez escalados los modelos, estos son comparados con la aplicación M3C2¹⁶ en el programa CloudCompare. Este, calcula la distancia entre puntos correspondientes a cada una de las nubes de puntos comparadas, con el fin de detectar diferencias/cambios en el tiempo producidos por los procesos erosivos. Estos cambios pueden corresponder a pérdida de material por desprendimientos (di-

ferencias positivas) o bien a deformaciones de la superficie ocasionadas debido al avance progresivo del material previo al desprendimiento (diferencias negativas). No obstante, existen otros procesos que pueden ocasionar cambios entre los modelos fotogramétricos como pueden ser cambios en la vegetación o artefactos generados durante la reconstrucción de los modelos fotogramétricos.

Con el fin de comprobar la calidad de los modelos fotogramétricos y verificar que los cambios detectados corresponden a cambios reales ocurridos en la superficie del tajo, se han comparado dos nubes de puntos consecutivas en el tiempo, se ha seleccionado un sector de la pared sin vegetación y sin cambios aparentes en las imágenes para obtener la media de las diferencias (0,001 m) y su desviación estándar (0,01 m). Con estos valores, el umbral de detección se sitúa en tan solo 0,02 m según Antonio Abellán Fernández y otros autores, que describen el umbral de detección como el doble de la desviación estándar de la comparación de dos modelos sin deformación¹⁷.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, para identificar los cambios producidos únicamente por los procesos erosivos que afectan el tajo de San Pedro, en primer lugar, se aplica el algoritmo Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)¹⁸, para la obtención de agrupaciones de puntos (clústeres) con valores de diferencia significativos (superiores a 3 cm), y posteriormente se realiza un filtrado que permiten

15. BLANCH GÓRRIZ, X.; ELTNER, A.; GUINAU SELLÉS, M.; ABELLÁN FERNÁNDEZ, A. «Multi-Epoch and Multi-Imagery (MEMI) Photogrammetric Workflow»..., *op. cit.* (n. 12), p. 1460.
16. LAGUE, D.; BRODU, N.; LEROUX, J. «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 (Basel, 2013), pp. 10-26. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>>.
17. ABELLÁN, A.; JABOYEDOFF, M.; OPIPKOFER, T.; VILAPLANA, J. M. «Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner»..., *op. cit.* (n. 6), pp. 365-372.
18. ESTER, M.; KRIEGEL, H.-P.; SANDER, J.; XU, X. «A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise». En: SIMOUDIS, E.; FAYYAD, U.; HAN, J. (eds.). *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland, OR, USA, 2-4 August 1996, pp. 226-231.



Il. 9. A) Representación de un clúster de puntos.

B) Triangulación del clúster de puntos con identificación de los valores de diferencia (h_1 , h_2 , h_3) de cada uno de los puntos que forman una faceta triangular.

C) Construcción de un prisma triangular a partir de tres puntos y la media de los valores de diferencia de sus vértices.

discriminar aquellos cambios que corresponden a procesos erosivos, de aquellos causados por otros procesos.

Para cada uno de los clústeres identificados como posibles desprendimientos, se calcula su volumen, mediante algoritmos específicos que generan una malla tridimensional de prismas triangulares, de los cuales se calcula su volumen a partir de la posición de los puntos que forman cada clúster y el valor de diferencia asignado a cada uno [il. 9]. A partir de la suma de volúmenes de los prismas que conforman cada clúster se obtiene el volumen de cada desprendimiento, pudiendo calcular el volumen total de material desprendido en cada período analizado y la media diaria.

Durante los dos primeros años de monitorización (seiscientos sesenta y nueve días), se han identificado trescientos treinta y cinco desprendimientos [il. 10]:

1. En el primer período analizado de julio de 2019 a noviembre de 2019 (ciento siete días) se han detectado ochenta y dos desprendimientos.
2. En el segundo período, de noviembre de 2019 a julio de 2020 (doscientos cincuenta días) se han detectado ciento veintiseis desprendimientos.

3. En el tercer período analizado, de julio 2020 a noviembre 2020 (ciento cinco días) se han identificado cuarenta y seis desprendimientos.

4. En el cuarto período, de noviembre de 2020 a mayo de 2021 (doscientos siete días) se han detectado ochenta y un desprendimientos. La siguiente tabla [fig. 2] resume las características de la actividad de desprendimientos encontrada en cada uno de los períodos analizados.

Los volúmenes de los desprendimientos identificados son relativamente pequeños (el 53% de los desprendimientos tienen volúmenes inferiores a $0,001 \text{ m}^3$ y el 87% volúmenes inferiores a $0,01 \text{ m}^3$, pero la actividad es prácticamente constante a lo largo de todo el año con un volumen medio diario desprendido de $0,004 \text{ m}^3$, lo que equivale a un bloque de $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}$ /día. El volumen total desprendido en todo el periodo analizado (seiscientos sesenta y nueve días, prácticamente dos años), es de $1,93 \text{ m}^3$.

DETECCIÓN DE ZONAS CON MAYOR ACTIVIDAD

Una vez obtenidos los clústeres correspondientes a desprendimientos, se realiza un mapa de densidad de desprendimientos mediante la aplicación de

PERÍODO	DÍAS	N.º DESPREND.	VOL. MÁX. (m ³)	VOL. TOTAL (m ³)	VOL. DIARIO (m ³)
07/2019 - 11/2019	107	82	0,513	0,844	0,008
11/2019 - 07/2020	250	126	0,264	0,735	0,003
07/2020 - 11/2020	105	46	0,014	0,048	0,001
11/2020 - 05/2021	207	81	0,105	0,303	0,002

Fig. 2. Número de desprendimientos identificados, características de los volúmenes encontrados y tasa de material desprendido diario para cada periodo analizado.

algoritmos específicos desarrollados por el Grupo RISK-NAT-UB. Este mapa, permite la identificación de aquellas zonas que tienen mayor actividad por desprendimientos. Como se puede observar [il. 11], la distribución de los desprendimientos en toda la superficie del tajo de San Pedro muestra cierta concentración en la parte central alta de la pared analizada, no obstante, se detectan desprendimientos en prácticamente toda la pared.

ANÁLISIS MAGNITUD-FRECUENCIA

Con el volumen de cada uno de los desprendimientos identificados se obtiene también la relación Magnitud (volumen)-Frecuencia (número de desprendimientos) propia del talud analizado. Relación que permite caracterizar la actividad del talud. La relación obtenida con los trescientos treinta y cinco desprendimientos detectados hasta la fecha permite identificar un claro predominio de volúmenes inferiores a 0,1 m³ [il. 12]. No obstante, dada la disminución en la frecuencia de ocurrencia de desprendimientos de volúmenes superiores, se recomienda seguir con la monitorización para poder nutrir la curva Magnitud-Frecuencia de un mayor número de datos que irá ajustando dicha función a la actividad real del escarpe.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

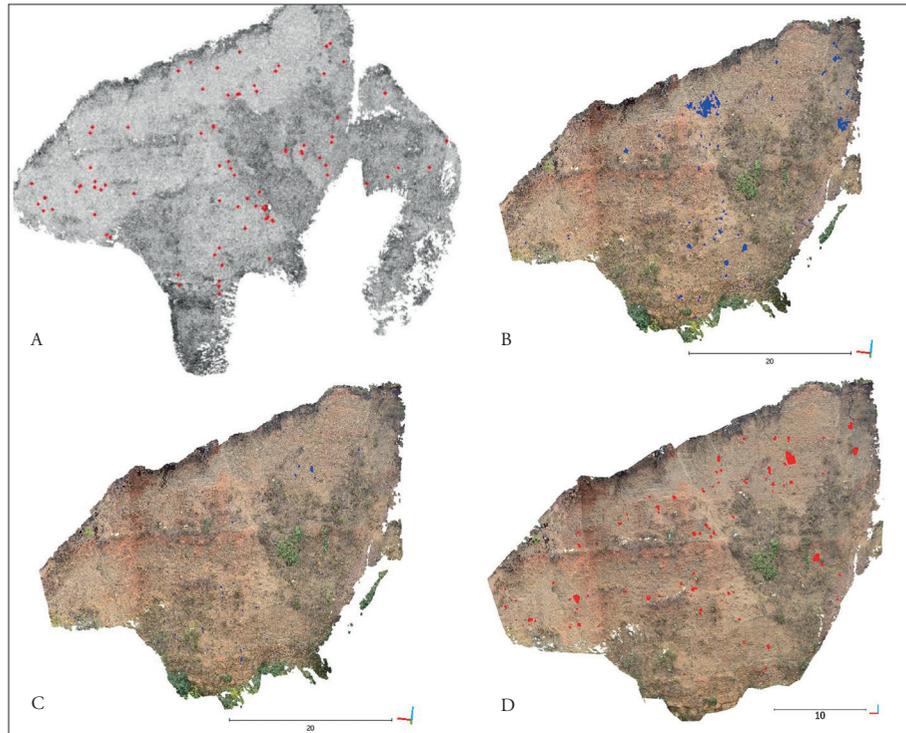
Una de las mayores dificultades del diseño e implementación de los sistemas fue encontrar cinco localidades, cercanas al escarpe y con una buena

visibilidad de este, y obtener los permisos para la instalación de los sistemas, atendiendo a las restricciones para la preservación del patrimonio histórico y cultural y evitar el impacto visual. Además, la ubicación de los sistemas en ventanas, arcos, balcones o terrazas ha condicionado el diseño de los sistemas, teniendo que adaptar sus componentes para optimizar la generación de energía, la recepción de la señal de conectividad o el ángulo y la visual sobre el tajo de San Pedro. Estas limitaciones condicionan la ubicación de las cámaras dificultando una idónea distribución de los sistemas para este tipo de estudios.

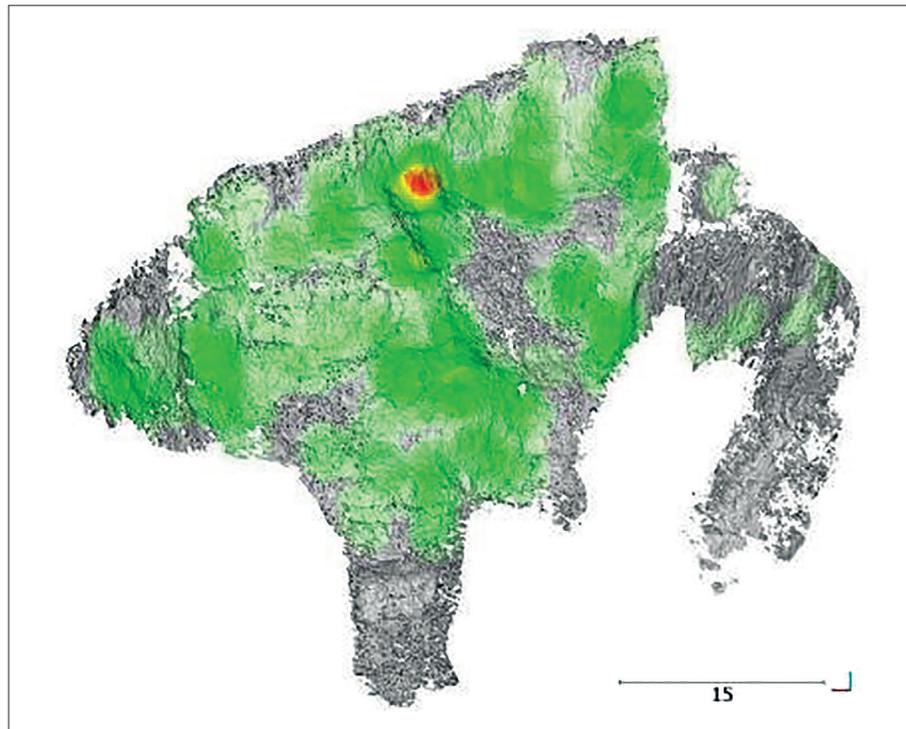
La ubicación de algunos sistemas no permite la instalación de los paneles solares con la orientación deseada. Esto, añadido a las pocas horas de insolación en estas posiciones durante el invierno ha comportado modificaciones del sistema de alimentación eléctrica respecto al diseño inicial en cuanto a los paneles solares, y en cuanto a las baterías.

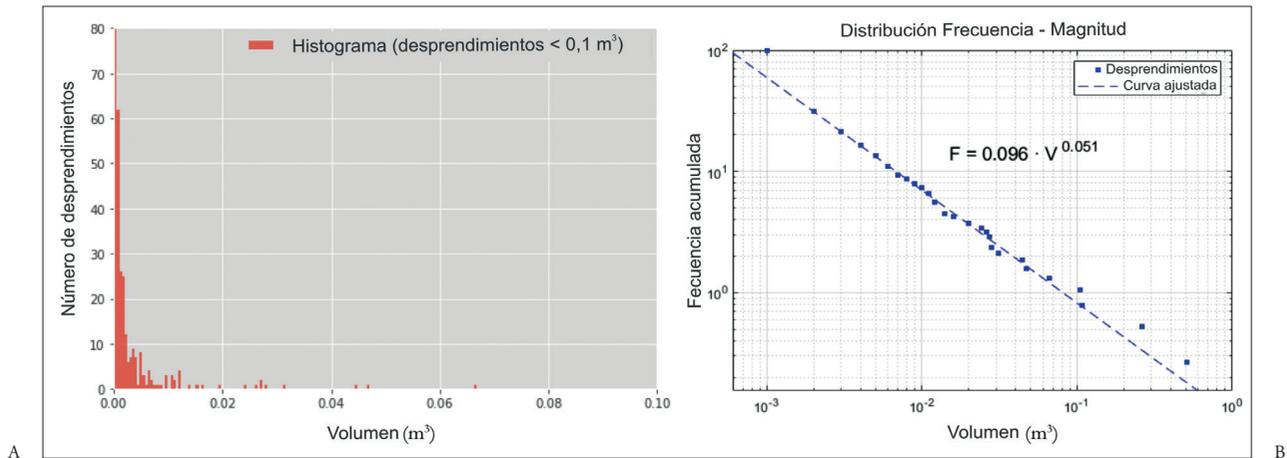
A pesar de las limitaciones encontradas, se ha conseguido una red de monitorización que permite la adquisición de cuatro tandas de fotografías diarias desde cinco puntos. Los resultados presentados en este artículo demuestran que el tajo de San Pedro es un escarpe activo con una alta actividad de desprendimientos durante todo el año. Los volúmenes de los desprendimientos identificados son relativamente pequeños (el 87% volúmenes inferiores a 0,01 m³), pero la actividad es prácticamente constante a lo largo de todo el año. Los trescientos treinta y cinco desprendimientos detectados

Il. 10.
 Desprendimientos identificados en el tajo de San Pedro. Cada color identifica el período analizado. El tamaño de los desprendimientos ha sido incrementado para facilitar su visualización. Modificado de BLANCH GÓRRIZ, Xabier. Tesis doctoral, 2022.



Il. 11. Mapa de densidad de desprendimientos en el que se pueden identificar en color rojo y anaranjado las zonas más activas del tajo de San Pedro y en color gris las zonas con menor actividad entre julio de 2019 y mayo de 2021 (escala en m).





Il. 12. Resultados obtenidos con la monitorización fotogramétrica de desprendimientos en un período de seiscientos sesenta y nueve días:

A) Histograma de distribución de desprendimientos.

B) Relación Frecuencia-Magnitud.

en todo el período analizado entre julio de 2019 y mayo 2021, han permitido obtener una relación Magnitud-Frecuencia ajustada a la actividad del tajo de San Pedro.

Con los datos analizados hasta la fecha no se ha encontrado un patrón de actividad estacional. De todos modos, es conveniente seguir analizando la ocurrencia de desprendimientos para poder determinar si el grado de actividad detectado corresponde a la actividad normal del escarpe o tiene alguna variación estacional.

Los resultados de este estudio demuestran que la monitorización fotogramétrica aporta la información necesaria para conocer los procesos erosivos que afectan el tajo de San Pedro. La continuación de la monitorización permitirá alcanzar una relación Frecuencia-Magnitud que represente de forma todavía más ajustada la actividad real del escarpe y por lo tanto conocer con mayor detalle la evolución de los procesos erosivos que lo afectan.

Además, otro análisis, que todavía no ha sido reportado dada su inexistencia en estos dos años y que puede aportar información relevante acerca de la actividad de los procesos erosivos en el tajo de San Pedro, es el análisis de deformaciones del es-

carpe previas a los desprendimientos, permitiendo detectar indicadores precursores de estos desprendimientos. En caso de movilización de grandes bloques que presenten una deformación previa relevante antes de su desprendimiento, nuestro sistema es capaz de detectarla y monitorizarla. Esta información será de gran utilidad para el diseño de medidas de protección adecuadas para reducir o detener la actividad de estos procesos.

El seguimiento de la monitorización permitirá además analizar la influencia de diversos factores ambientales (lluvia, volumen de agua de riego, terremotos, humedad superficial, etc.) en la dinámica de los procesos erosivos, permitiendo establecer una correlación entre estos procesos erosivos y los potenciales factores desencadenantes.

Además, dados los buenos resultados obtenidos en la monitorización del escarpe y en la cuantificación de los desprendimientos tanto en términos numéricos como volumétricos, esta estrategia de monitorización puede ser de gran utilidad para la verificación de los novedosos estudios y estrategias que el PAG valora aplicar directamente en el escarpe en un futuro, ya que podemos obtener con facilidad un índice de referencia sobre su efectividad.

Finalmente, también en el campo de la innovación, gracias a la estrecha colaboración entre las universidades y el PAG, y como parte del proyecto de monitorización del tajo de San Pedro se están utilizando los datos obtenidos mediante los sistemas fotogramétricos descritos para el desarrollo de algoritmos novedosos de inteligencia artificial que permitirán automatizar de manera sin precedentes la

detección de desprendimientos en tiempo real. Así mismo, dada la escasez de estudios similares, dicho estudio puede servir de modelo para el desarrollo de futuros sistemas de monitorización de desprendimientos en contextos con restricciones para el desarrollo de sistemas de monitorización, dificultades constructivas (por su ubicación en zonas expuestas a procesos activos) y/o con protección patrimonial.