

# COMUNICACIÓN DE LA GEOINFORMACIÓN 3D MEDIANTE VISORES WEB Y ENTORNOS INMERSIVOS DE REALIDAD MIXTA EN PROBLEMAS DE TALUDES Y LADERAS

**Oriol PEDRAZA (1), Marc JANERAS (1,2), Josep A. GILI (2), Lucia STRUTH (1), Felipe BULL (2), Marta GUINAU (4), Anna FERRÉ (5) y Joan ROCA (6)**

(1) Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)  
oriol.pedraza@icgc.cat, marc.janeras@icgc.cat, lucia.struth@icgc.cat

(2) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)  
j.gili@upc.edu, felipe.buill@upc.edu

(3) Grupo de Investigación Consolidado RISKINAT  
Universitat de Barcelona (UB)  
mguinau@ub.edu

(4) Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC)  
aferre@fgc.cat

(5) BGC Engineering Inc. (BGC), Canada  
JRoca@bgcengineering.ca

## RESUMEN

*La revolución experimentada por el uso creciente de la geoinformación 3D en la ingeniería geológica, gracias a los avances tecnológicos, que progresivamente han facilitado una disponibilidad de técnicas de adquisición de datos y de herramientas para su análisis. Junto a los avances experimentados en la disponibilidad de recursos de computación y almacenamiento en la nube, han impulsado la expansión de numerosas aplicaciones que permiten la difusión de la geoinformación 3D en la web. A pesar de estos avances científico-técnicos, es común ver los datos 3D simplificados en imágenes estáticas 2D, perdiendo parte su potencialidad comunicativa. El objetivo de esta comunicación es presentar el diseño y las funcionalidades de unos visores web 3D de código abierto como una herramienta de sencilla utilización con la que interactuar y visualizar los resultados. Así mismo, estamos ensayando las posibilidades de la realidad mixta como una experiencia plenamente inmersiva para lograr una mejor comunicación de la geoinformación 3D.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años el crecimiento exponencial en el uso de técnicas como el LiDAR (*Light Detection and Ranging*) y la fotogrametría digital nos ha permitido obtener datos de naturaleza 3D, con rapidez, versatilidad y facilidad de uso sin precedentes. El Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) como titular competente en la geoinformación pública de Catalunya ha seguido esta evolución, de modo que la utilización de estas nuevas técnicas ha mejorado enormemente la forma en que vemos, entendemos y modelamos los procesos superficiales de la Tierra. Su aplicación en el campo de la gestión y mitigación de los riesgos geológicos ha tenido gran desarrollo, ya que integra los principios de las ciencias geológicas y geomorfológicas con el análisis y las técnicas de la ingeniería para proporcionar soluciones fiables y sostenibles.

En este sentido, el uso de superficies del terreno como nubes de puntos 3D de alta resolución, conteniendo una información más precisa y densa, está cambiando los enfoques clásicos de investigación, monitorización y modelización de los fenómenos naturales a diferentes escalas espaciales y temporales. Esta evolución se puede seguir en la bibliografía geocientífica desde Janeras *et al.* (2004), Buckley *et al.* (2008), Jaboyedoff *et al.* (2012), Santana *et al.* (2012), Bemis *et al.* (2014), Riquelme *et al.* (2015), Williams *et al.* (2018), Ruiz *et al.* (2020) hasta Pugsley *et al.* (2021).

A pesar de estos avances científico-técnicos, es común ver los datos 3D simplificados en imágenes estáticas 2D, perdiendo parte su potencialidad comunicativa dentro del proceso circular de dato–información–conocimiento. El ICGC, en la búsqueda para facilitar la comunicación y comprensión de los datos geoespaciales, y poder compartir sus contenidos con una amplia audiencia de forma sencilla, ha realizado pruebas satisfactorias con en el renderizador Potree, desarrollado por Markus Schütz en el año 2016. Esta herramienta ha permitido generar diferentes visores web con los que interactuar con grandes conjuntos de datos 3D como vía para mostrar los resultados de varios proyectos en ejecución.

Recientemente, la tecnología de realidad mixta ha proporcionado interesantes vías para explorar los datos espaciales de manera inmersiva e intuitiva. En particular, desde 2021, en el marco del proyecto de investigación GeoRisk, se han hecho pruebas piloto sobre las posibilidades que ofrecen los dispositivos de realidad mixta, los cuales mezclan el universo físico y digital. Con estos dispositivos se han podido “liberar” los datos geoespaciales 3D previamente atrapados en pantallas 2D, permitiendo la visualización de los datos en forma de modelos holográficos 3D colocados en el entorno real, siendo la base de novedosas experiencias inmersivas de interés científico-técnico, educacional y divulgativa para el público en general.

## 2. GEOINFORMACIÓN 3D EN INGENIERÍA GEOLÓGICA

El uso de nubes de puntos 3D empieza a ser habitual en las geociencias como demuestra el análisis que realizó Abellán, *et al.* (2016) en la base de datos *Web of Sciences*, donde se refleja que las investigaciones con este tipo de datos obtenidos con LiDAR y más recientemente con fotogrametría digital (Figura 1), han crecido mucho más rápido que el resto de las publicaciones geocientíficas.

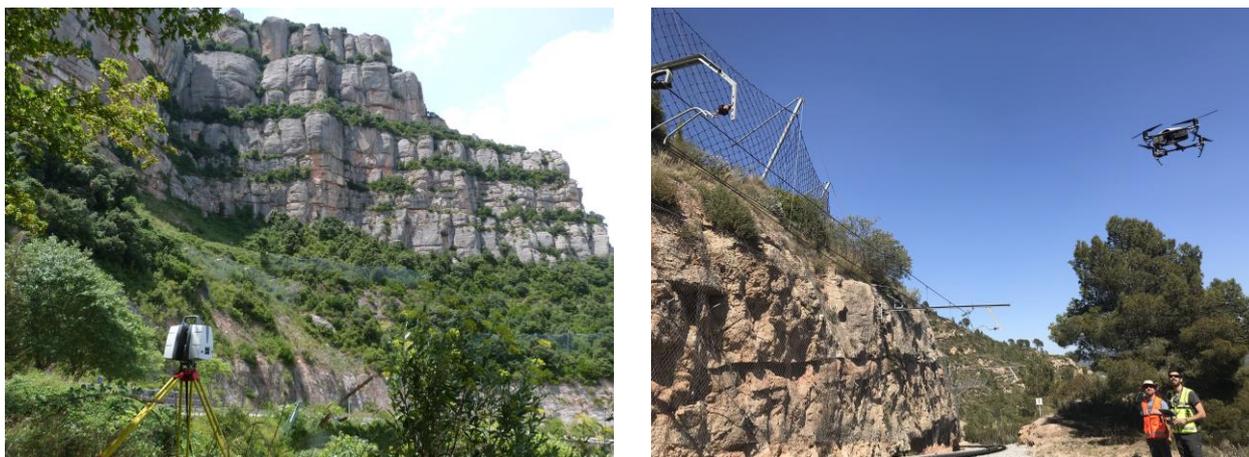


Figura 1. Ejemplos de captura de datos 3D con LiDAR terrestre y fotogrametría digital con dron (UAV), en el macizo Montserrat.

La tecnología LiDAR, de gran auge en los años 90 del siglo pasado, genera directamente nubes de puntos 3D mediante la radiación masiva de pulsos láser de los cuales registra el retorno y calcula la distancia al objeto reflector acorde al tiempo de vuelo o la fase. La nube de puntos tiene el atributo de la intensidad regresada o reflectividad del objeto, lo cual configura una imagen monocroma en el modelo (Jaboyedoff *et al.* 2012).

Por otro lado, la técnica fotogramétrica digital obtiene la geometría 3D a base de post-procesado de imágenes 2D y, aunque en su formato estereoscópico el desarrollo cubre gran parte del siglo pasado, en los últimos quince años ha experimentado un gran auge gracias a la técnica de *Structure from Motion* (SfM), que hace una reconstrucción masiva y redundante para completar geometrías plenamente 3D. Eso ha sido posible por la accesibilidad a todo tipo de dispositivos fotográficos digitales y la implementación de paquetes de software fáciles de usar que ha ido en consonancia a la capacidad de computación disponible actualmente en las computadoras domésticas. Complementariamente, se ha visto impulsado por los avances tecnológicos que han experimentado los vehículos aéreos no tripulados (UAV), permitiendo obtener grandes cantidades de material fotográfico y, por sus características, poder cubrir más superficie y ángulos de visión de las zonas de estudio reduciendo las zonas de sombra y obteniendo mejores resultados, en particular en terrenos de fuerte inclinación como son los taludes (Westoby *et al.* 2012).

Ambas técnicas son de naturaleza muy distinta, lo que también las hace complementarias para el estudio de inestabilidad de taludes y laderas (Janeras *et al.*, 2018 y Núñez-Andrés *et al.* 2019). Estos modelos 3D permiten obtener en detalle la superficie del terreno y poder analizar la geometría y la geomecánica del macizo rocoso. Complementariamente se puede monitorear los movimientos del terreno y la actividad de los fenómenos. En este último caso, se requiere la reiteración de modelos 3D a lo largo del tiempo, con lo que llegamos a hablar de modelos 4D (Figura 2). A pesar de ello, muy a menudo esta cantidad y calidad de la geoinformación 3D queda poco visible en la comunicación de los resultados obtenidos y aún nos encontramos sujetos al soporte 2D estático, típicamente el formato PDF.

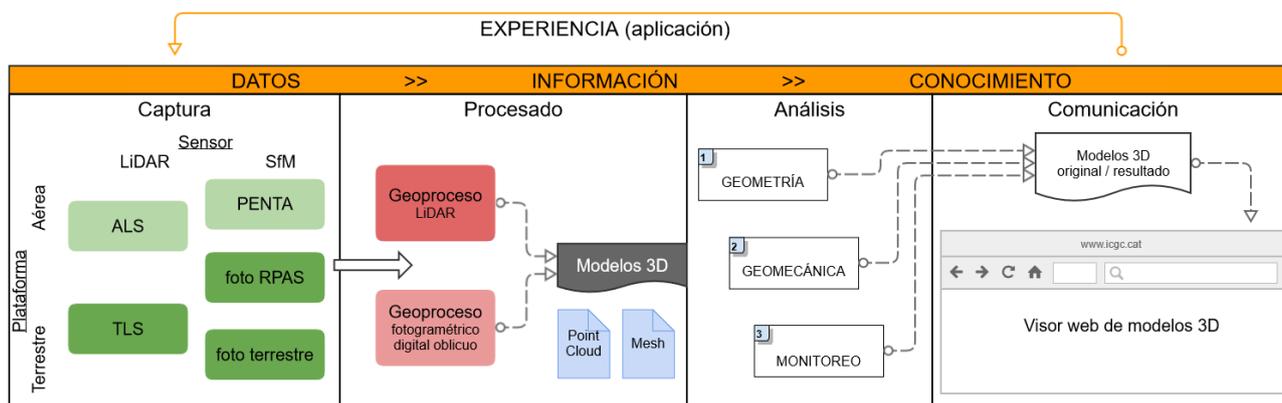


Figura 2. Diagrama del proceso de captura del dato 3D, procesado de la información a modelos 3D que permite distintos análisis que conducen a la generación de conocimiento a comunicar.

### 3. ANTECEDENTES DE VISUALIZACIÓN 3D ON-LINE

La necesidad de visualizar y manipular datos de naturaleza 3D en diferentes entornos tanto en software de escritorios como en entornos web, permitiendo la ágil manipulación de los objetos que conllevan una gran cantidad de datos ha sido siempre un binomio crítico para los desarrolladores informáticos. Fue a raíz de esta necesidad que ya en el año 1992 surgió la librería OpenGL, para mejorar la velocidad de las aplicaciones graficas de escritorio 2D y 3D. La constante evolución de los procesadores gráficos y navegadores web, dio pie al desarrollo de la librería Web Graphics Library (WebGL) en el año 2011, que permite renderizar gráficos 3D directamente en el navegador sin necesidad de ningún complemento adicional *o plug-in*.

La disponibilidad de recursos de computación y almacenamiento en la nube, ha ido cambiando la forma en la que se consumen los datos, y en particular las nubes de puntos 3D. En estos años se han desarrollado multitud de librerías y renderizadores de nubes de puntos basados en el consumo web. Esto en parte ha sido posible gracias a que la comunidad científica, cada vez más, participa y contribuye en plataformas de código abierto, propiciando una eficiencia colaborativa y permitiendo el testeo e implementación de prototipos desarrollados por diferentes autores.

De las múltiples soluciones que se pueden encontrar, esta comunicación se centra en el renderizador Potree, desarrollado por Markus Schütz en el año 2016, basado en los algoritmos de Instant Points (Wimmer *et al.* 2006). Ambas investigaciones fueron impulsadas por el Institute of Computer Graphics and Algorithms, TU Wien, donde utilizan múltiples librerías para su funcionamiento. La principal diferencia en comparación a otros renderizadores es la aplicación del algoritmo *Potree's octree structure*. Este consiste en estructura de múltiples resoluciones de los datos, donde la organización de la información se divide en subpartes o ramas y cada parte almacena un nivel de detalle (Figura 3). En el momento de la visualización se cargan solo aquellos nodos que son visibles desde la perspectiva del usuario y según el zoom utilizado. A medida que, el usuario modifica la posición y escala del modelo 3D, la plataforma va llamando y desplegando nuevos nodos, lo que permite renderizar billones de puntos y solo estar visualizando en tiempo real los nodos implicados (Schütz 2016a). Para lograr que las nubes de puntos, que se encuentran tradicionalmente en una estructura de datos en formato *LAS*, *LAZ*, *PTX* o *PLY*, se conviertan a la estructura de datos *Potree's octree*, se dispone de la herramienta PotreeConverter (Schütz 2016b). Esta herramienta nos permite que la información original sea subdividida en nodos y que se almacene en múltiples archivos de formato *BIN*.

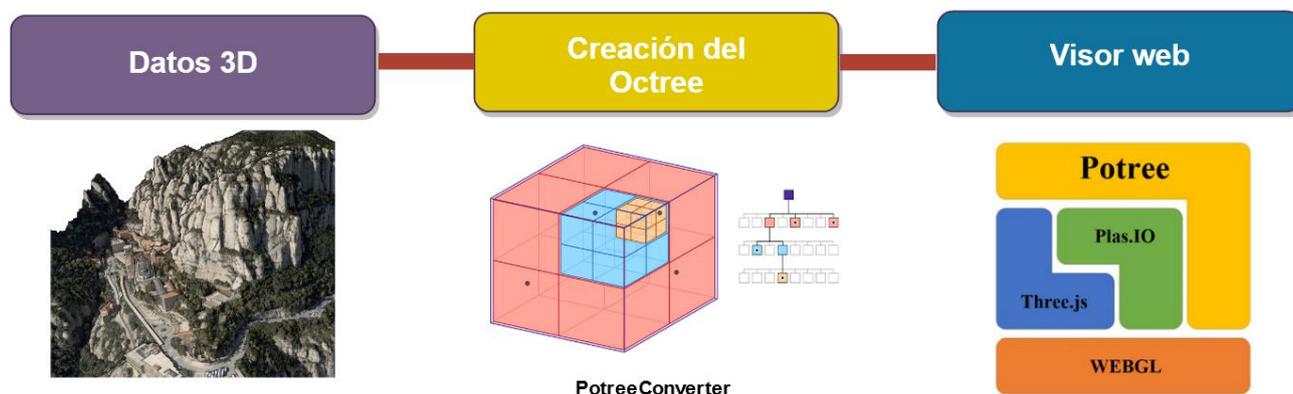


Figura 3. Esquema de conversión de una nube de puntos 3D a la estructura de datos octree, con la herramienta PotreeConverter y representación de las contribuciones de código abierto que conforman el renderizador web Potree.

#### 4. VISORES WEB 3D DE GEORIESGOS Y GEOTECNIA

En este capítulo se presenta algunos ejemplos de visores web 3D aplicados a ingeniería geológica y geotecnia de taludes y laderas con datos de distinta naturaleza (LiDAR y fotogrametría). Estos se han diseñado pensando en un público amplio y la accesibilidad del visor está garantizada por una amplia compatibilidad con los navegadores actuales. Además, se han mantenido la navegabilidad nativa de Potree, al ser intuitiva para todos los usuarios a los que se les demostró el visor (Pedraza, 2021). La construcción del visor no es “point and click”, pero sí sencilla para los usuarios familiarizados con la interfaz de línea de comandos y con algo de programación básica. Se ha conservado gran parte de las líneas de código original de Potree 1.8 (<https://github.com/potree/>) para facilitar el proceso de creación y futuras actualizaciones o mejoras. Con los archivos estáticos no es necesario un complejo servidor web para transferir los archivos al cliente. Esto permite añadir combinaciones a las publicaciones, donde la aplicación debe estar disponible años después, ya sea adjuntándola a la publicación o almacenando la aplicación en un almacén de objetos de bajo mantenimiento.

Las principales características de estos visores web se centran en la importación y manejo de la nube de puntos 3D. Según las características del visor, este puede presentar más de una nube de puntos 3D y complementariamente se ha incorporado como fondo del visor las librerías de código abierto de la plataforma *Cesium.js*. Está diseñada con un enfoque de Tierra virtual que nos permite cargar todo tipo de servicios de mapas base (ráster tiles) y modelos digitales del terreno (terrain), publicados como recursos en abierto en Open ICGC (<https://openicgc.github.io/>).

Dentro del visor se ha introducido un mini-mapa de orientación 2D que también representa el campo de visión del usuario y, a su vez, el usuario puede moverse independientemente de la vista 3D. En cuanto el cursor está en el mapa, se muestran en la esquina superior derecha las coordenadas y haciendo doble clic en el mapa se enfocará (objetivo de la cámara) la vista 3D en este punto y moverá la cámara cerca del punto (posición de la cámara). En esta misma sección, se habilita la función de exportación de la visión actual en formato imagen y en la parte inferior se muestra un botón que despliega la leyenda en caso de que el usuario la necesite. A la izquierda del visor se sitúa la barra lateral de configuración, donde se puede ajustar los parámetros de visualización, y se dispone de un *kit* de herramientas de medición e interpretación, todas ellas obtenidas de las librerías de Potree. También se puede descargar las mediciones realizadas en formatos *JSON* y *DXF* y trasladar así esa información a programas SIG y CAD (Figura 4).

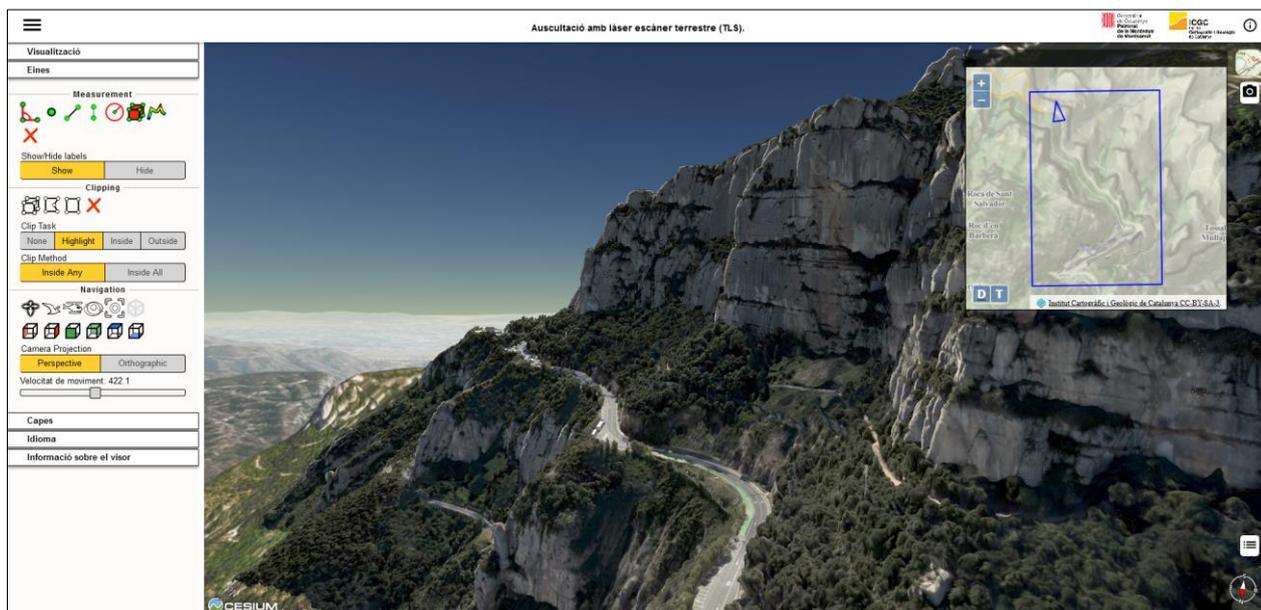


Figura 4. Visor web 3D. La barra lateral de configuración está a la izquierda, en la parte central la nube de puntos 3D superpuesta a la ortofotografía con relieve y en la derecha el mini-mapa de orientación 2D.

#### 4.1 Monitoreo de desprendimientos de rocas

Desde 2014, el ICGC ejecuta un plan de mitigación del riesgo geológico en el macizo de Montserrat (PMRGM), situado a unos 50 km al noroeste de Barcelona (Buxó *et al.* 2017). En esta montaña residen dos valores patrimoniales de primer orden en Catalunya: el parque natural de gran singularidad geológica e interés excursionista, y el monasterio milenario de tradición religiosa e interés cultural y turístico. Entre ambos espacios, en 2019 se contabilizaba una frecuentación superior a 3 millones de visitantes anuales. Esta elevada exposición humana, combinada con la peligrosidad de caída de rocas intrínseca del macizo, configura un riesgo geológico relevante que el PMRGM pretende gestionar en un equilibrio entre la protección estructural y la preservación sostenible del espacio. Para lograrlo resulta imprescindible comprender el comportamiento del macizo rocoso y sus factores desencadenantes de desprendimientos de roca, mediante la implementación de diferentes sistemas de monitorización (Janeras *et al.* 2017).

En este sentido, la detección de desprendimientos de rocas a partir de la comparación de nubes de puntos obtenidas por LiDAR terrestre, ha sido objeto de una línea de investigación académica iniciada por Abellán (2009) y seguida por Royán, (2015), Blanch (2016), Garcia-Badal (2018), Blanco *et al.* (2021) y Pedraza *et al.* (2022), a raíz de la colaboración impulsada por el ICGC con el Grupo de Investigación Consolidado RISKMAT de la Universidad de Barcelona (UB). Disponemos de una serie continua de escaneos y un inventario de desprendimientos detectados de más de 10 años en diferentes emplazamientos del macizo, obteniendo una relación magnitud-frecuencia. Esta es la base para el análisis cuantitativo del riesgo de caída de rocas (QRA), ya que nos permite definir escenarios de cierta magnitud a los que asignar una probabilidad anual de ocurrencia (Janeras *et al.* 2021).

Con toda esta información de naturaleza 3D, que hasta ahora siempre ha sido presentada de forma estática y plana (2D), sin la posibilidad directa de interactuar con los datos y sus atributos, se inició una prueba piloto para generar un visor web 3D para visualizar los desprendimientos detectados con LiDAR terrestre en la pared de Degotalls norte (Pedraza *et al.* 2021) inspirada en Rosser *et al.* (2018). En esta comunicación se presenta una nueva versión del visor, con la nueva interfaz descrita en el apartado anterior, donde se representan los centroides de los desprendimientos detectados entre 2007 y 2020 en las paredes del monasterio y de Degotalls norte y este. Estos son visualizados sobre el modelo fotogramétrico 3D partir de las imágenes obtenidas con la cámara aerotransportada oblicua PENTA RCD30 y mediante unos vuelos de alto recubrimiento realizados por el ICGC el año 2015.

Otro ejemplo de monitorización de los cambios en la superficie de escarpes es el que se está realizando en las columnas basálticas de la localidad de Castellfollit de la Roca, que conforman uno de los paisajes más emblemáticos de la comarca de la Garrotxa y uno de los testigos más importantes del vulcanismo de Catalunya. En este caso, la dinámica de desprendimientos de rocas genera un riesgo de descalce de las edificaciones del pueblo, que se encuentra en su coronación. Se monitorea la actividad de desprendimientos para caracterizar este retroceso, así como movimientos precursores de caídas, que se han identificado en forma de vuelco de columnas basálticas (Abellán *et al.*, 2011; Matas *et al.*, 2022). En este caso se ha generado un visor web 3D con los desprendimientos detectados con TLS (Terrestrial Laser Scanner) en la vertiente norte y noreste de las paredes basálticas entre los años 2008 y 2018, donde se representan las agrupaciones de las nubes de puntos de los desprendimientos detectados sobre el modelo fotogramétrico 3D obtenido mediante vuelos programados con dron, realizado por el ICGC durante el mes de julio del 2018 (Figura 5).

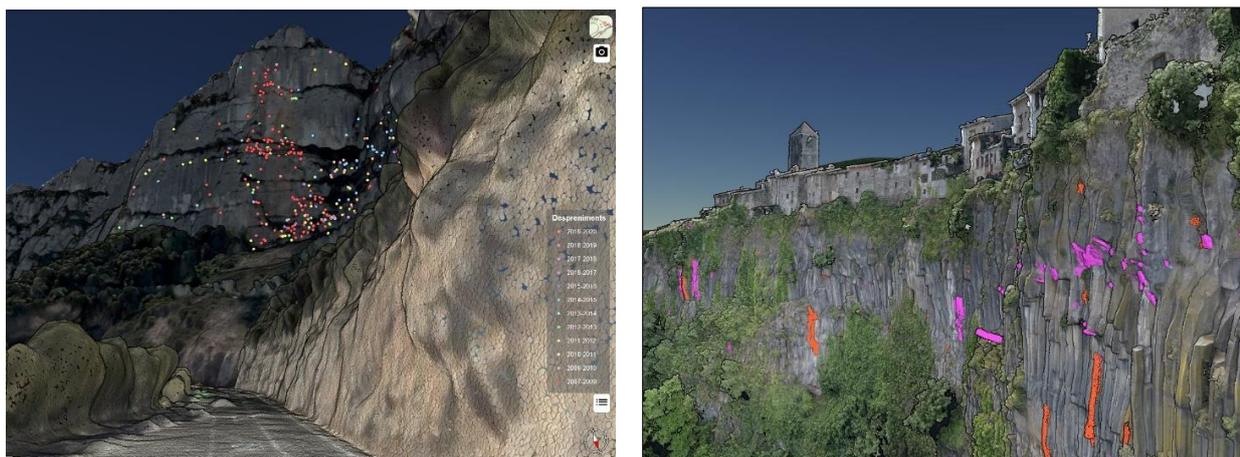


Figura 5. Vista de los desprendimientos detectados (centroides) en la pared de Degotalls norte y este desde el emplazamiento donde se sitúa el LiDAR Terrestre. Vista de las columnas basálticas desprendidas (clústeres) en la cara norte de la pared basáltica a vista de dron.

## 4.2 Instrumentación de paredes rocosas

Retomando el caso del macizo de Montserrat, también se aplicó otra técnica de monitoreo de los grandes bloques potencialmente inestables en zonas de mayor interés para el PMRGM y para el seguimiento geológico y geotécnico en del Cremallera de Montserrat de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC).

Desarrollando una red instrumental de sensores de contacto en el macizo, agrupados por proximidad en estaciones con distintas configuraciones, tanto cableadas como *wireless*. Siendo una instrumentación en la superficie de una pared rocosa vertical, resulta de interés un visor 3D como recurso descriptivo de la red de sensores en relación con la disposición estructural del bloque (Janeras *et al.* 2016). En este ejemplo se muestra la capacidad del visor de mostrar los elementos espaciales que conforman la red y consultar mediante ventanas emergentes a NetMon, el software propio desarrollado por el ICGC para visualizar los datos disponibles de los sensores mediante gráficas de su evolución temporal (Figura 6).

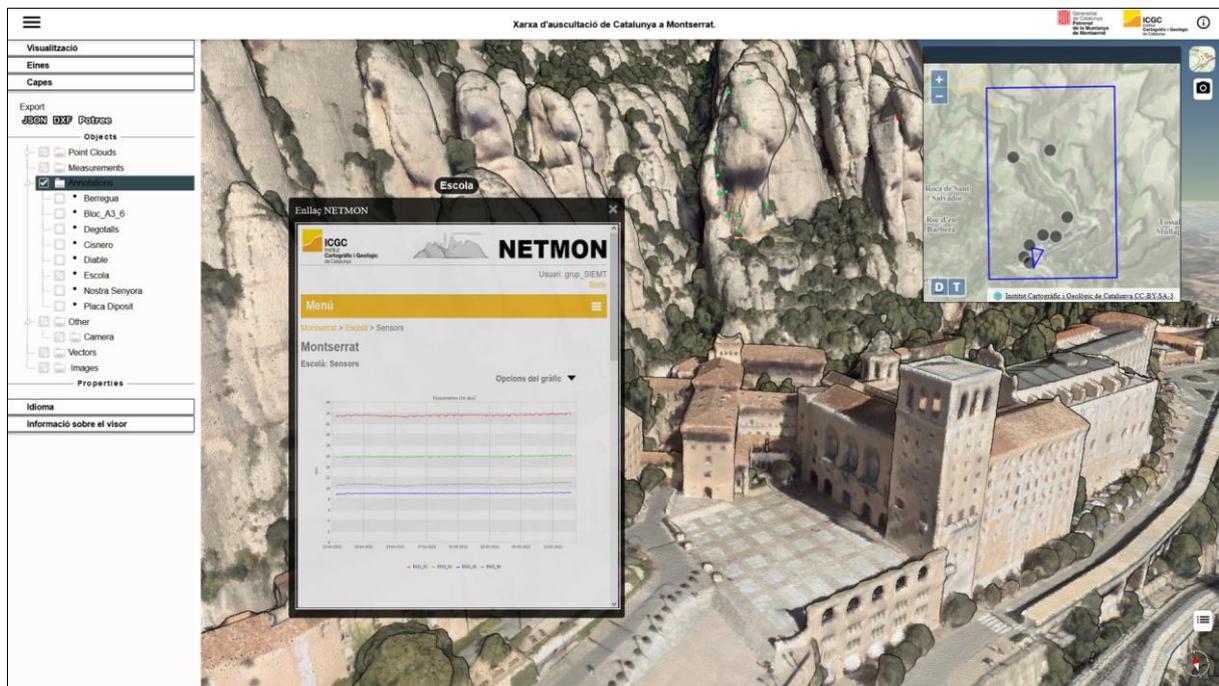


Figura 6. Visor web 3D de red de auscultación instalada en el recinto del monasterio de Montserrat, donde mediante una ventana emergente se muestra la consulta NetMon para visualizar los datos de los sensores instalados en ese sector.

### 4.3 Gestión de activos geotécnicos en infraestructuras lineales

Como ya se citaba en el punto anterior para el Cremallera de Montserrat, el ICGC realiza un seguimiento geológico y geotécnico de toda la red de FGC, incluyendo su variedad de líneas ferroviarias y las estaciones de montaña y esquí. Se trata de la labor conjunta de gestión de activos geotécnicos en su amplio espectro (taludes, laderas, muros, túneles, terraplén y obras de drenaje). Podemos distinguir la tarea inicial de catálogo o inventario de los activos de la tarea diferida en el tiempo de seguimiento de su estado, con objeto de planificar las actuaciones de mantenimiento y de mejora continua de la seguridad. Esta labor de más de 20 años ha conllevado un importante volumen de información que, en su evolución a lo largo de los años, se articuló en una base de datos y una interfaz web para su consulta. En su versión presentada en este simposio (Santana *et al.* 2017) incluye un visor web 2D de las bases cartográficas escalables sobre las cuales se muestran los activos geotécnicos objetivo del seguimiento, de modo que, por navegación y selección, se accede directamente a la información relacionada. En los últimos años se ha incorporado el uso de drones para la inspección con la visión de aplicaciones expuestas anteriormente y análogas a Tomás *et al.* (2019), obteniendo modelos 3D fotogramétricos de los activos.

Un visor web 3D es un buen aliado en este entorno de trabajo, y en concreto se han desarrollado unos visores para mostrar los catálogos de muros de contención levantados mediante vuelos con dron durante los últimos 3 años en distintas líneas de FGC. La principal diferencia con los anteriores visores es que estos contienen múltiples modelos fotogramétricos 3D distribuidos en el espacio, permitiendo la navegación entre ellos mediante el uso de un mapa 2D. Adicionalmente a través de las etiquetas donde se indica la codificación interna del activo geotécnico, se puede consultar el estado del activo y las recomendaciones de actuación (Figura 7).

## 5. POTENCIAL COMUNICATIVO DE LA REALIDAD VIRTUAL

En este apartado se hace una introducción a la comunicación de la geoinformación 3D mediante realidad mixta. En contraste con los visores web, que indudablemente son un recurso natural y de presente, la comunicación mediante realidad mixta parece ser una tecnología del futuro, pero en realidad esta tecnología ya ha sido usada satisfactoriamente en proyectos públicos y privados, facilitando la comunicación de información 3D compleja entre expertos y no expertos de todas las edades.



Figura 7. Visor web 3D del catálogo de muros de contención de la línea Llobregat-Anoia de FGC, donde se ejemplifican algunas de las herramientas de medición presentes en el visor y complementariamente se puede consultar el estado del activo.

### 5.1. Entornos de realidad física y virtual

La información digital se puede mostrar en la realidad física en un amplio espectro de formas. En el contexto de este documento, la realidad física es el terreno, los taludes y laderas y sus dinámicas. La comunicación sobre esta materia también tiene su realidad física, ya que es entre personas que comparten conocimiento, y lo pueden hacer en el terreno directamente en contacto con el problema, o en gabinete, gracias a la capacidad de abstracción. Para esta comunicación se usan distintos canales y herramientas. Hay una parte importante que generalmente se realiza de forma oral, pero el detalle técnico tiene necesidad de listar datos, de graficarlos, y las imágenes ganan frente a las palabras. Es aquí donde aparece la realidad mixta, ya que permite visualizar toda la información relativa al terreno, ya sea alfanumérica o gráfica en cualquier formato. Actualmente, toda información está en formato digital, y en principio solo sale a formato físico sobre soporte papel o pantalla 2D en informes finales o consultas establecidas. Con la realidad mixta se puede liberar a los usuarios de estas experiencias basadas en soporte 2D, permitiendo la colaboración inmersiva de distintos usuarios caminando libremente alrededor de la geoinformación 3D de una forma más natural e intuitiva. A continuación, se exponen distintos escenarios comunicativos (Figura 8).

- **Realidad disociada:** es la común hasta la fecha. La realidad física es todo el entorno donde se produce la comunicación, sea en terreno o gabinete. La geoinformación 3D está contenida en soportes 2D segregados que actualmente son digitales (dispositivos de pantalla plana) sustituyendo el soporte papel, aunque este se mantiene en el campo por su facilidad de manejo.
- **Realidad ampliada o aumentada:** en un contexto similar al anterior, sobreponemos geoinformación a la realidad física, ya sea proyectando información sobre una maqueta, o a través de un dispositivo de pantalla 2D que muestra la visión de la realidad física y le sobrepone contenido digital.
- **Realidad mixta:** ambas realidades física y digital confluyen y se diluyen para proporcionar una experiencia inmersiva para todos los usuarios. Eso se consigue acoplando el dispositivo digital a la visión estereoscópica humana natural, compuesta por un par de ojos y un cerebro que reconstruye la percepción 3D. El dispositivo ya no es una pantalla plana, sino unas gafas holográficas (*head mounted display*) que no impiden la visión de entorno físico ni la comunicación entre usuarios, permitiendo una experiencia más natural e intuitiva.

- **Realidad virtual:** el usuario desconecta de la realidad física, porque un dispositivo envolvente de realidad virtual permite sólo percibir el entorno digital; la inmersividad es absoluta, pudiendo solo comunicar con otros usuarios mediante el uso de avatares; y limitando el movimiento del usuario dentro del entorno físico. Por eso solo es aplicable en entorno gabinete que pueda ser seguro para la persona.

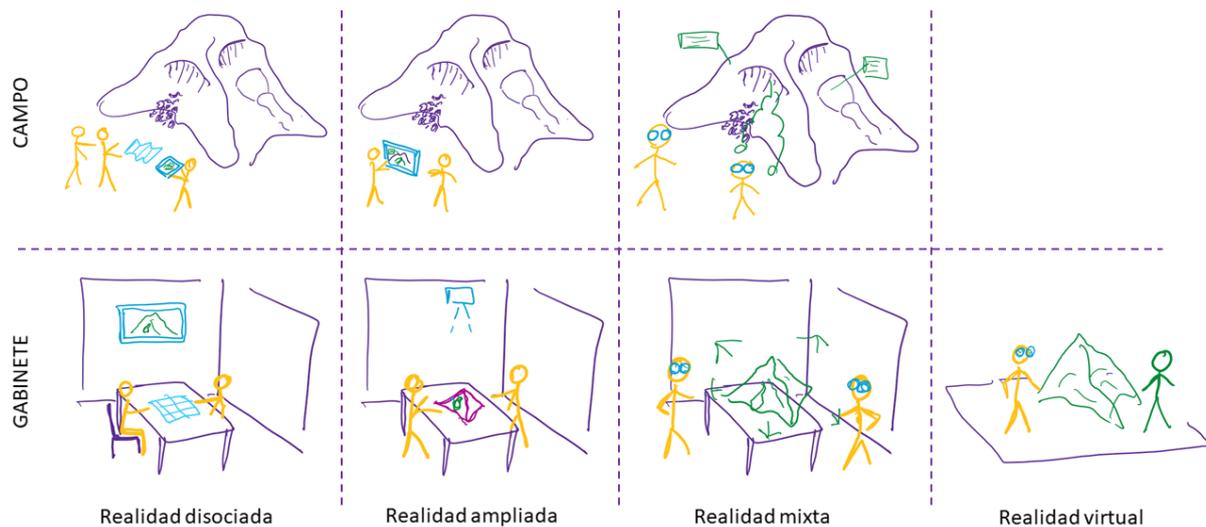


Figura 8. Escenarios comunicativos entre la realidad física y virtual en entornos de terreno o gabinete .

Los ejemplos de visores web 3D expuestos en el apartado 4 corresponden aún al primer entorno, aunque son un intento avanzado de transmitir geoinformación 3D sobre soporte de pantalla plana. La interactividad y el movimiento es lo que permite percibir la naturaleza 3D en un soporte 2D. Es el último paso en el entorno digital de toda la evolución de siglos de dibujo plano, jugando con proyecciones, perspectivas, renderizaciones, etc. Los visores web 3D son nuestro presente a explotar intensamente. Pero nuestro futuro a explorar está en la realidad mixta, tal como se expone a continuación.

## 5.2. Realidad mixta con dispositivos holográficos

En el marco del proyecto de investigación GeoRisk se están experimentando las posibilidades comunicativas de la realidad mixta mediante dispositivos holográficos. La técnica se basa en unas gafas situadas ante los ojos del usuario (*head mounted display*). Frente a cada ojo se proyectan dos vistas del modelo 3D, ligeramente distintas. La visión estereoscópica humana consigue la visualización en 3D. Al ser las gafas semitransparentes, el usuario ve también el entorno físico que le rodea. Mediante sensores de movimiento y gracias a un mapeo constante del entorno físico, el dispositivo consigue el acople del modelo 3D virtual y la realidad, quedando anclado el modelo virtual al entorno físico. Así, la visualización es estable, y puede ser compartida por las distintas personas equipadas con las gafas. Usando el seguimiento ocular y manual, los dispositivos permiten que el usuario manipule e interactúe con los hologramas como si se trataran de objetos reales. Como los usuarios pueden interactuar sobre el mismo modelo y a la vez entre ellos de forma natural, se facilita la interrogación de los datos presentados y la comunicación de ideas para llegar a un entendimiento común de forma rápida. Con ello, técnicos, académicos e investigadores pueden mostrar y comunicar los datos o resultados de estudios de forma efectiva a todas las partes interesadas.

La tecnología que se está experimentando incluye dispositivos holográficos HoloLens de Microsoft y el software *Ada Platform* desarrollado por la compañía Clirio Inc en colaboración con la consultoría BGC Engineering Inc. *Ada* es un software basado en la nube que permite la conversión de modelos digitales 3D ya disponibles en múltiples formatos a modelos holográficos 3D para las HoloLens. Una vez convertidos, los modelos holográficos 3D se cargan a las HoloLens vía la aplicación *Ada*

previamente instalada en el dispositivo, desde cualquier parte donde se disponga de conexión a internet. Una vez cargado, el modelo holográfico 3D se ancla en el espacio real usando las HoloLens y se comparte la sesión para que un máximo de 10 usuarios se conecte usando otros dispositivos HoloLens o dispositivos de realidad aumentada (iPhone o iPad) en el caso de no disponer de dispositivos HoloLens. Durante la visualización, *Ada* permite cambiar las dimensiones del modelo 3D, desde escala reducida hasta escala natural (1:1).

Hasta la fecha, esta tecnología ha sido principalmente usada en Norteamérica por empresas consultoras privadas como BGC, organismos públicos como el Gobierno Federal de Canadá o el *Department of Transportation* de Estados Unidos de América, educadores y científicos como la *Simon Fraser University* de Canadá o la *Case Western Reserve University* de Estados Unidos de America, permitiendo la rápida y efectiva comunicación de complejos problemas 3D. También se está usando de manera tentativa en las actividades de diseminación de resultados del proyecto GeoRisk. A continuación, se incluyen imágenes ilustrativas de las referidas actividades (Figura 9), en las que la visualización de la Geoinformación 3D permite analizar en detalle, por ejemplo, la fragmentación de bloques rocosos en ensayos de lanzamiento a escala real (Gili *et al.* 2022).



Figura 9. Ejemplo de diseminación de resultados del proyecto GeoRisk: inspeccionando un modelo a escala 1:1 correspondiente a un bloque de roca (imagen derecha) lanzado sobre el talud de una cantera (imagen izquierda). A pesar de que el bloque sufrió una intensa fragmentación durante la prueba de lanzamiento, aún puede ser estudiado y medido hoy gracias al modelo virtual obtenido mediante fotogrametría terrestre envolvente.

Es muy interesante la posibilidad de compartir la misma visualización 3D, poder verla desde distintos puntos de vista, y la posibilidad inmersiva (entrar en los modelos). *In extremis*, los diferentes observadores pueden estar compartiendo la misma sesión de trabajo desde espacios o ciudades distintas, visualizando el mismo modelo holográfico 3D, y trabajando sobre él de manera coordinada. Lo único necesario es estar conectado por internet al mismo grupo de usuarios.

## 6. CONCLUSIONES

En la actualidad, la posibilidad de obtener datos de naturaleza 3D sobre los procesos superficiales de la Tierra resulta trascendental en su aplicación en el campo de la gestión y mitigación de los riesgos geológicos, mejorando notablemente la investigación, la toma de decisiones o en la generación de conocimiento a comunicar. El avance de la tecnología en la disponibilidad de recursos de computación y almacenamiento en la nube ha permitido crear potentes visores web 3D, facilitando la combinación de nubes de puntos 3D generados mediante el uso de diferentes técnicas. Aunque no se dispone de visores web 3D ya hechos de código abierto, la existencia de prototipos desarrollados por diferentes autores permite que a los usuarios familiarizados con la interfaz de línea de comandos y con algo de programación básica, puedan testearlas e implementarlas. En este sentido, las pruebas realizadas con el renderizador Potree han demostrado sin duda que se trata de una herramienta muy potente para visualizar, analizar e interactuar con grandes conjuntos de datos 3D.

Aunque los visores web 3D expuestos en esta comunicación son nuestro presente a explotar intensamente. El futuro nos llevará a la realidad mixta y virtual, ya que, en ingeniería geológica, minera, geotécnica, la visualización de la geoinformación subterránea en 3D y de manera conjunta, ha sido siempre un tema insuficientemente resuelto. La cantidad y variedad de la geoinformación dificulta su presentación conjunta, lo que abocaba a puntos de vista muy particulares (planta y sección) que muchas veces dependían de las preferencias del técnico especialista. Estas técnicas son y serán una ayuda para superar esta limitación, especialmente para presentar resultados complejos a usuarios finales no especialmente expertos en visión 3D y 4D. Los usuarios “no-expertos” pueden ser claves porque ven los datos desde un punto de vista diferente, y pueden ayudar a identificar problemas diferentes a los previstos por los científicos e ingenieros involucrados en un determinado proyecto. Los dispositivos holográficos son de mayor ayuda, cuanto más complejos son los modelos 3D (túneles, galerías, diferentes materiales y estructura del terreno), y cuanto más diversas son las fuentes de geoinformación (litología, sondeos, ensayos, diagráfias en sondeo, resultados de geofísica eléctrica o sísmica, georadar, presencia y circulación de contaminantes en el subsuelo, etc.).

## 7. AGRADECIMIENTOS

Entre las distintas colaboraciones que han convergido en este trabajo, se cita el soporte del proyecto de I+D+i "Avances en el análisis cuantitativo del riesgo de caída de rocas, QRA, incorporando desarrollos en geomática" (GeoRisk) con código de referencia PID2019- 103974RB-I00, financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033.

## REFERENCIAS

- Abellán, A., 2009. *Improvements in our understanding of rockfall phenomenon by Terrestrial Laser Scanning. Emphasis on change detection and its application to spatial prediction*. Universitat de Barcelona - PhD.
- Abellán, A.; Vilaplana, J.; Calvet, J.; Garcia-Sellés, D.; Asensio, E., 2011. Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning - Case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11. 829-841. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-829-2011>.
- Abellán, A., Derron, M.-H., and Jaboyedoff, M., 2016. Use of 3D Point Clouds in Geohazards. Special Issue: Current Challenges and Future Trends. *Remote Sensing*, 8, 130. <https://doi.org/10.3390/rs8020130>.
- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T., and Bangash, H.A., 2014. Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology, *Journal of Structural Geology*, v. 69, p. 163–178, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>.
- Blanch, X., 2016. *Anàlisi estructural i detecció de desprendiments rocosos a partir de dades LiDAR a la Muntanya de Montserrat*. Trabajo final de grado. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Blanco, L., García-Sellés, D., Pascual, N., Puig, A., Salamó, M., Guinau, M., Gratacos, O., Muñoz, J.A., Janeras, M., Pedraza O., 2021. Identificación y clasificación de desprendimientos de roca con LIDAR y machine learning en Montserrat y Castellfollit de la Roca (Catalunya). In: *X Congreso Geológico de España*, Vitoria-Gasteiz, España.
- Buckley, S.J., Howell, J.A., Enge, H.D., and Kurz, T.H., 2008. Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, v. 165, p. 625–638, <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-100>.
- Buxó, P., Janeras, M., Domènech, G., Pons, J., Prat, E., López, F., 2017. Development of a Rockfall Risk Mitigation Plan in the Montserrat Massif (Central Catalonia, Spain). In: M. Mikoš et al. (eds.) *Advancing Culture of Living with Landslides*, Springer International Publishing. 4th World Landslide Forum, WLF, Ljubljana, Slovenia, pp. 677-684. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5\\_78](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5_78).
- García-Badal, M., 2018. *Millora metodològica per a la detecció i caracterització de desprendiments amb dades LiDAR terrestre a la Muntanya de Montserrat*. Master Thesis. Universitat de Barcelona.
- Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R., Matas, G., Moya, J., Prades, A., Corominas, J., Mavrouli, O., 2022. Rockfalls: Analysis of the block fragmentation through field experiments. *Landslides*, 19 (5), 1009-1029.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012. Use of LiDAR in Landslide Investigations: A Review. *Natural Hazards*, 61, 5–28

- Janeras, M., Navarro, M., Arnó, G., Ruiz, A., Kornus, W., Talaya, J., Barberà, M., López, F., 2004. LiDAR applications to rock fall hazard assesment in Vall de Núria. In: *4th Mountain Cartography Workshop*, International Cartographic Association, ICA.
- Janeras, M., Jara, J.A., López, F., Marcè, A., Carbonell, T., Elvira, A., 2016. Development of a wireless sensor network for rock mass deformation monitoring in the Montserrat Massif. In: *3rd RSS Rock Slope Stability Symposium*, Lyon, France.
- Janeras M., Jara, J.A., Royán, M.J., Vilaplana, J.M., Aguasca, A., Fàbregas, X., Gili, J.A., Buxó, P., 2017. Multitechnique approach to rockfall monitoring in the Montserrat massif (Catalonia, NE Spain). *Engineering Geology*. 219, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.010>.
- Janeras, M., Gili, J.A., Palau, J., Buxó, P., 2018. Checking the complementarity of different LiDAR / photogrammetry terrain models for rockfall mitigation in a demanding environment. In: *3rd Virtual Geoscience Conference*, Kingston, Canada.
- Janeras, M., Pedraza, O., Lantada, N., Hantz, D., Palau, J., 2021. TLS -and inventory-based Magnitude - Frequency relationship for rockfallin Montserrat and Castellfollit de la Roca. In: *5th RSS Rock Slope Stability Symposium*, Chambéry, France.
- Matas, G, Prades, A., Núñez-Andrés, A., Buill, F., Lantada, N., 2022. Implementation of a fixed-location time lapse photogrammetric rock slope monitoring system in Castellfollit de la Roca, Spain. In: *5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2022)*, Valencia, April 6-8.
- Núñez-Andrés, A., Buill, F., Puig, C., Lantada, N., Prades, A., Janeras, M., Gili, 2019. Comparison of geomatic techniques for rockfall monitoring. In: *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, mayo 2019, Atenas, Grecia.
- Pedraza, O., Janeras, M., Buxó, P., 2021. Visualización de la actividad de caída de rocas mediante visor web de nube de puntos 3D. In: *XIV Jornadas SIG Libre*, Girona. <http://m.diobma.udg.edu/handle/10256.1/6198>
- Pedraza, O., Aronés A.P., Puig C., Janeras M., Gili J.A., 2022. Rockfall monitoring: comparing several strategies for surveying detached blocks and their volume, from TLS point clouds and Gigapan pictures. In: *5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Valencia, Spain.
- Pugsley, J., Howell, J., Hartley, A., Buckley, S., Brackenridge, R., Schofield, N., Maxwell, G., Chmielewska, M., Ringdal, K., Naumann, N., Vanbiervliet, J., 2021. Virtual Fieldtrips: construction, delivery, and implications for future geological fieldtrips. DOI: 10.5194/gc-2021-37.
- Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195. 10.1016/j.enggeo.2015.06.009.
- Rosser, N.J., Williams, J., Jones, R., Wilkinson, M., 2018. Live web-based presentation of 3D coastal rockfall monitoring. In: *3rd Virtual Geoscience Conference*, Kingston, Canada.
- Royán, M.J., 2015. *Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR terrestre*. PhD Thesis, Vilaplana (Adv.) Universitat de Barcelona.
- Ruiz Carulla, R., Corominas, J., Gili, J.A., Matas, G., Lantada, N., Moya, J., Albert, P., Núñez, M.A. Buill, F., Polo, C., 2020. Analysis of Fragmentation of Rock Blocks from Real-Scale Tests. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080308>.
- Santana, D., Corominas, J., Mavrouli, O., Garcia-Sellés, D., 2012. Magnitude-frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, 145, 50–64.
- Santana, D., Pons, J., Rodríguez, H., Prat, E., López, F., Janeras, Marc., Buxó, P., Ferré, A., Paret, David., Comellas, J., 2017. Plataforma on-line para el seguimiento geológico y geotécnico de la red ferroviaria de FGC. In: *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Santander, Espanya.
- Schütz, M., 2016a. *Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers*. Thesis in visual computing. Faculty of Informatics at the Vienna University of Technology, Viena, Austria, 2016.
- Schütz, M., 2016b. *PotreeConverter-Uniform Partitioning of Point Cloud Data into an Octree*. Reporte técnico. Vienna University of Technology, Viena, Austria, 2016.
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J.L., Pagán, J.I., Asensio, J.L., Ruffo, M., 2019. Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección* (2020) 55, 1–15. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. “Structure-from-motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Williams, J., Rosser, N., Hardy, R., Brain, M., Afana, A., 2018. Optimising 4-D surface change detection: An approach for capturing rockfall magnitude-frequency. *Earth Surface Dynamics*, 6. 101-119. DOI: 10.5194/esurf-6-101.
- Wimmer, M., Scheiblauer, C., 2006. Instant Points. In: *Proceedings Symposium on Point-Based Graphics*. Eurographics. Boston, USA: Eurographics Association, July 2006, pp. 129–136. isbn: 3-90567-332-0.