

Análisis de límites de detección y cálculo de volumen de desprendimientos en escarpes rocosos mediante datos LiDAR y fotogramétricos

Maria Elena Montaña Quintero
Codirección: Xabier Blanch (Ub) y Marta Guinau (Ub)

Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos
Especialidad: Riesgos Geológicos

Julio 2019



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

UAB

Universitat Autònoma
de Barcelona

Análisis de límites de detección y cálculo de volumen de desprendimientos en escarpes rocosos mediante datos LiDAR y fotogramétricos

Maria Elena Montaña Quintero

Codirección: Xabier Blanch (UB) y Marta Guinau (UB)
Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos 2018-2019 (UB-UAB)
Especialidad: Riesgos Geológicos
Julio 2019

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the limits of detection and calculation of volume of rockfalls, through the use of LiDAR and photogrammetry. Also, part of the study, focuses on the comparison of two different instruments for the acquisition of photogrammetric data. The pilot study area is located at the Puigcercós cliff (Pallars Jussà). The behavior of this cliff, has been widely studied in preliminary investigations through the use of LiDAR technology. However, one of the limitations of this technique is the high cost of acquiring and processing the data and the temporary restrictions that this implies. The use of photogrammetry in this type of research, is not widely developed, however, offers the possibility of data acquisition at a much lower cost than the LiDAR. For this reason, it is to be determined the cost-benefit ratio of this technique, taking into account the high precision of the results obtained with LiDAR technology. For the analysis of the information, it is carried out: 1) Sensitivity analysis and 2) Quantitative analysis of the volumes of the rockfalls identified by means of the analysis of data acquired in different dates (2018 vs 2019). Through the observed results and the analysis of the calculations of volumes the rockfalls with photogrammetry, it is obtained that this technique provides results comparable to those obtained by LiDAR technology. Additionally, it is found that the use of better resolution photographic cameras for photogrammetry, does not necessarily imply contribution to a better definition of the geometries for the creation of optimum quality point clouds.

Key Words: LiDAR – Photogrammetry - Rockfall - Monitoring.

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de los límites de detección y cálculo de volúmenes de desprendimientos de rocas, mediante el uso de LiDAR y fotogrametría. También, parte del estudio, se centra en la comparación de dos diferentes instrumentos de adquisición de los datos fotogramétricos. El área de estudio se localiza en el Escarpe de Puigcercós (Pallars Jussà). La dinámica de este escarpe, ha sido ampliamente estudiada en investigaciones preliminares mediante el uso de tecnología LiDAR. Sin embargo, una de las limitaciones de esta técnica, es el alto coste de adquisición y tratamiento de los datos y las restricciones temporales que eso implica. La implementación de fotogrametría en este tipo de investigaciones, no se encuentra ampliamente desarrollada, sin embargo, ofrece la posibilidad de adquisición de datos a un coste mucho más bajo que el LiDAR. Por tal razón, se desea determinar la relación coste-beneficio de esta técnica, teniendo en cuenta las altas precisiones de los resultados obtenidos con tecnología LiDAR. Para el análisis de la información, se realiza: 1) Análisis de sensibilidad y 2) Análisis cuantitativo de volúmenes de los desprendimientos, identificados por medio del análisis de datos adquiridos en diferentes fechas (2018 vs 2019). Por medio de los resultados observados y del análisis de los cálculos de volúmenes de desprendimientos con fotogrametría, se obtiene que esta técnica aporta resultados equiparables a los que se obtienen por medio de tecnología LiDAR. Adicionalmente, se encuentra que el uso de cámaras fotográficas de mejor resolución para la fotogrametría, no implica necesariamente, aporte a una mejor definición de las geometrías para la creación de nubes de puntos de calidad óptima.

Palabras claves: LiDAR - Fotogrametría - Desprendimientos de rocas- Monitoreo.

Contenido

1	Introducción.....	3
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Zona de estudio.....	4
2.	Metodología.....	6
2.1	Fase 1: Obtención de datos.....	7
2.2	Fase 2: Tratamiento de los datos	8
2.2.1	Nubes de puntos densa (Pre-Tratamiento).....	8
2.2.2	Alineación y comparación	9
2.2.3	Detección de desprendimientos	10
2.2.4	Cálculo de Volúmenes.....	11
2.3	Fase 3: Análisis.....	11
2.3.1	Análisis de sensibilidad	11
2.3.2	Análisis cuantitativo de volúmenes	13
3	Resultados.....	14
3.1	Nubes de puntos densas.....	14
3.2	Análisis de sensibilidad	14
3.3	Análisis cuantitativo de volúmenes	15
3.3.1	Alineación y comparación global del escarpe	15
3.3.2	Alineación y comparación por desprendimientos seleccionados	17
3.3.3	Delimitación de desprendimientos y cálculo de volúmenes.....	17
4	Discusión.....	18
4.1	Análisis de sensibilidad	18
4.2	Análisis cuantitativo de volúmenes	20
5	Conclusiones.....	22
6	Agradecimientos.....	23
7	Referencias	23

1 Introducción

Los desprendimientos o caídas de rocas se pueden definir como toda masa rocosa que se separa de una ladera con pendiente casi vertical, la masa rocosa cae libremente y se fragmenta en bloques rocosos más pequeños (Copons, 2008).

Estos fenómenos naturales son el movimiento de ladera más frecuente y peligroso en áreas de montaña (Whalley, 1984; Erismann & Abele, 2001), debido a que se producen comúnmente en unidades morfológicas muy escarpadas. Sin embargo, también se encuentran fuertemente asociados a zonas modificadas antrópicamente, como creación de taludes en procesos de construcción de infraestructuras y vías de comunicación, aumentando la inestabilidad las laderas y generando nuevas zonas de peligrosidad.

Los fragmentos de roca que caen ladera abajo producto de estos eventos, la energía asociada a las trayectorias de viaje, su impacto y capacidad de producir daño, están estrechamente relacionadas a su volumen (Cardinali et al., 2002; Portilla et al., 2010). Sin embargo, aunque un gran desprendimiento puede causar cuantiosas destrozas y pérdidas económicas, una alta recurrencia de eventos de pequeña magnitud pueden configurar una situación de peligrosidad considerable. Dimensionar la peligrosidad de los fenómenos naturales es de suma importancia, ya que permite determinar los recursos financieros, técnicos y humanos necesarios para prevenir, mitigar los efectos y responder ante cualquier evento de este tipo.

Por tal razón, profundizar en la investigación, caracterización y cuantificación de los volúmenes y la frecuencia de materiales desprendidos, permite identificar la intensidad de los eventos y con esto la estimación de la peligrosidad asociada.

El uso y manejo de nubes de puntos tridimensionales, obtenidas mediante tecnología LiDAR y fotogrametría en investigaciones de caracterización y monitoreo de desprendimientos de rocas, se ha intensificado a lo largo de las últimas décadas como lo mencionan Abellán et al. (2014) y Jaboyedoff et al. (2012).

Gran parte de estos estudios han usado la tecnología LiDAR y aunque se han generado grandes y óptimos resultados y ha demostrado un avance considerable en la detección y caracterización de desprendimientos, el cálculo de volúmenes y la obtención de relaciones magnitud-frecuencia, una de las limitaciones de esta técnica es el alto coste de adquisición y tratamiento de los datos, por tal razón, una restricción es la resolución temporal de la información.

Por otro lado, la fotogrametría permite obtener información métrica de un objeto y sus relaciones espaciales a través de medidas realizadas en fotografías (Matías, 2013). Aunque la implementación de esta técnica en este tipo de investigaciones no se encuentra tan ampliamente desarrollada, ofrece la posibilidad de adquisición de datos a un coste mucho más bajo que el LiDAR, y adicionalmente, obtener un beneficio en la resolución temporal, ya que permite desarrollar sistemas de adquisición de datos instalados y automatizados en campo. Sin embargo, se debe determinar la relación coste-beneficio de esta técnica, teniendo en cuenta las altas precisiones de los resultados obtenidos con tecnología LiDAR.

1.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo, es identificar los límites de detección y cálculo de volumen de desprendimientos en escarpes rocosos, mediante análisis temporales de datos fotogramétricos y LiDAR en el escarpe de Puigcercós (comarca del Pallars Jussà).

Como objetivos específicos, se desea analizar desprendimientos de roca por medio de información LiDAR e información fotogramétrica, comparar entre diferentes técnicas de adquisición de datos fotogramétricos y contrastar resultados para determinar los límites de detección de la fotogrametría respecto a la información LiDAR.

1.2 Zona de estudio

Al noroeste de Cataluña, dentro de los relieves que constituyen el Pre-pirineo meridional, región de la comarca Pallars Jussà en la Provincia de Lleida (Cuevas, 1992) (Figura 1a), se localiza un escarpe de coronación producto de un antiguo deslizamiento de gran magnitud, que de acuerdo a Vidal (1881) ocurrió en la noche del 13 de enero de 1881.

Este relieve, conocido como el Escarpe de Puigcercós debido a la población que originalmente se ubicaba en ese sector, cuenta con unas dimensiones de aproximadamente 40 m de alto y 140 m de ancho (Figura 1c), se encuentra constituido por una secuencia sedimentaria de capas del Eoceno con disposición subhorizontal, la cual alterna capas de espesor variable de margas grises, areniscas limos y arcillas (Cuevas, 1992).

El evento que origino dicho escarpe, fue caracterizado según la clasificación de Varnes, 1978, como un *complex roto-translational slide* (Corominas & Alonso, 1984) y afectó un área de 78.520 m² (Figura 1b). Gran parte de la población de Puigcercós de aproximadamente 50 habitantes y hoy día conocida como Puigcercós Vell, fue destruida y debió ser reubicada unos 700m hacia el este.

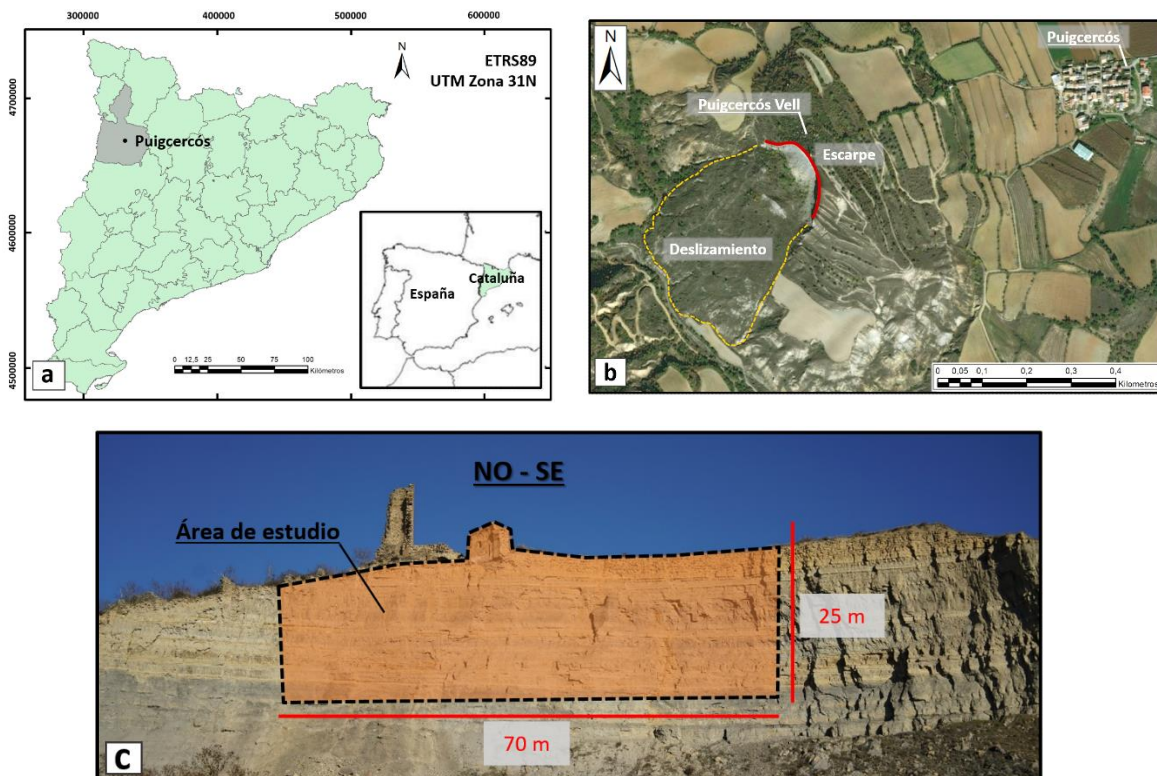


Figura 1 . a) Situación geográfica de la zona de estudio b) Ortofotografía 25cm (ICGC) en la que se delimita el deslizamiento de Puigcercós (escarpe principal en rojo y cuerpo del deslizamiento en amarillo) c) Imagen del área de estudio sobre el escarpe.

Este deslizamiento no ha presentado reactivaciones y se considera actualmente inactivo (Blanch et al. 2017b). Sin embargo, el escarpe de Puigcercós (Figura 2), especialmente su zona central, experimenta una fuerte actividad geomorfológica y una alta frecuencia de desprendimientos de rocas, los cuales varían en dimensiones desde centímetros hasta centenas de metros cúbicos (Abellan et al. 2010; y Royan et al. 2014).

Las dimensiones de estas rocas desprendidas, están asociadas en gran medida a la intersección existente entre los planos de estratificación y grietas de tensión subparalelas al escarpe (cicatriz de coronación) (Blanchard et al. 2008) y originadas de igual forma, por los procesos geomorfológicos existentes. Así mismo, los procesos erosivos que actúan en el sector, también intensifican la ausencia de vegetación y por tanto permite una visibilidad óptima de las rocas y estructuras presentes en el escarpe.

Por estas razones, en el escarpe de Puigcercós, el grupo de investigación RISKNAT de la Universidad de Barcelona, desde el año 2007, está realizando tareas de investigación (Abellán et al. 2014; Royán et al. 2015a; Blanch et al. 2017b). Actualmente, dentro del proyecto PROMONTEC (MINEICO-AEI/FEDER, UE: CGL2017-84720-R), en el cual está vinculado este trabajo, RISKNAT está desarrollando un sitio experimental para el desarrollo de técnicas y herramientas para la caracterización y monitoreo de desprendimientos de rocas.

El control y monitoreo de la actividad en este escarpe, permite registrar la evolución natural de los procesos, ya que posterior a la reubicación de la población, no existen elementos expuesto que deban ser protegidos de la dinámica del sector. En otras palabras, al no existir un riesgo asociado, no es necesario ejecutar medidas de mitigación que modifiquen la dinámica de los procesos.

Basados en las evidencias observadas y el comportamiento registrado mediante estas investigaciones preliminares, Royán et al. (2015a) estableció que el mecanismo de inestabilidad dominante en este escarpe es el *rock toppling* (*block toppling* según la revisión de Hungr et al. (2014), y en algunos casos, existen eventos asociados a *rock falls*.

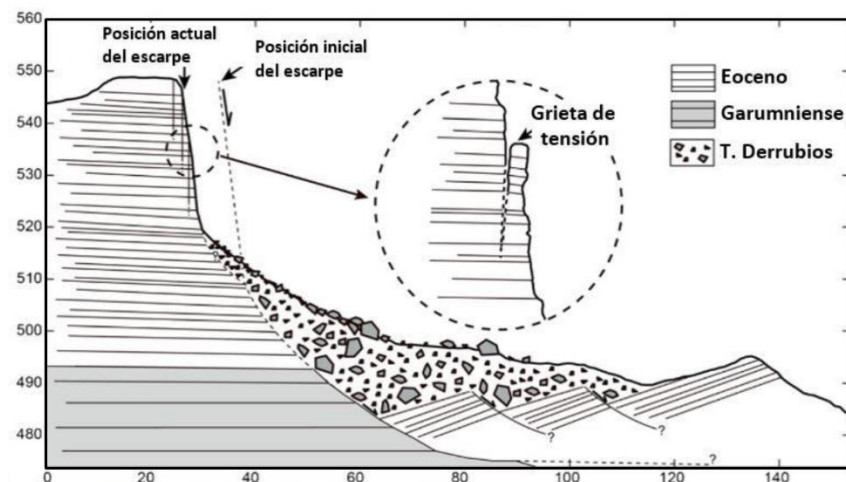


Figura 2. Perfil transversal del escarpe de Puigcercós. Tomado de Blanch et al. (2017b).

La actividad y frecuencia de los eventos en este escarpe, puede intensificarse debido a las fuertes precipitaciones y factores climáticos característicos del clima mediterráneo (Copons, 2008).

Aunque el estudio de la dinámica de este escarpe, ha sido ampliamente estudiado en investigaciones preliminares, este trabajo de investigación, pretende identificar y cuantificar desprendimientos de rocas presentes en el escarpe de coronación de Puigcercós, mediante el reconocimiento de geometrías y dimensiones por medio del uso de tecnología LiDAR y fotogramétrica, de esta forma realizar una comparativa entre los resultados de ambos procesamientos, sus alcances y sus limitaciones.

2. Metodología

La metodología que se ha desarrollado para la obtención de los objetivos, combina técnicas, herramientas y procedimientos ejecutados de forma sucesiva, los cuales se han estructurado en tres fases, una fase inicial de obtención de datos, seguido del procesamiento de los mismos y finalizando con el análisis e interpretación de los resultados. Esta se resume en el esquema de trabajo presentado en la Figura 3 y se detalla en los siguientes apartados, haciendo énfasis en la descripción de las características principales de los instrumentos utilizados en la adquisición de datos y los diferentes métodos que se han aplicado en el tratamiento de los mismos.

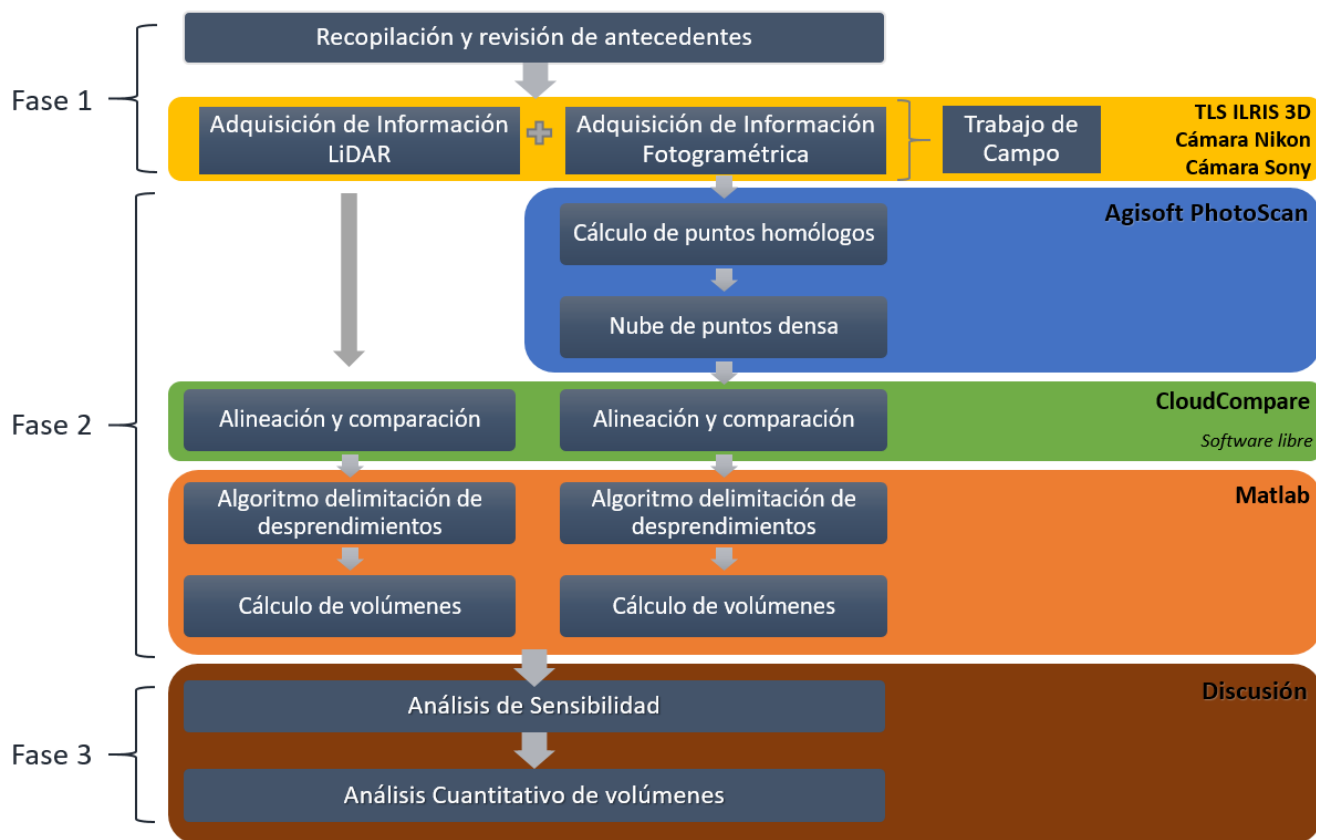


Figura 3 . Flujo de trabajo metodológico

2.1 Fase 1: Obtención de datos

En primer lugar, con el objetivo de recopilar información de utilidad para el presente estudio (informes y publicaciones), se realiza una amplia consulta de antecedentes de las técnicas a desarrollar y de la zona de estudio.

La adquisición de los datos a procesar, se realiza por medio del trabajo de campo, en el cual se procede, por un lado, a la obtención de datos LiDAR, y por otro, la obtención de fotografías de alta resolución para el desarrollo de modelos fotogramétricos. Esta información será la base para el desarrollo de las técnicas y procedimientos con el objetivo de la detección de desprendimientos y el cálculo de sus volúmenes.

La información LiDAR se obtiene mediante el uso de un LiDAR terrestre de largo alcance TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) de tecnología TOF (Time Of Flight) modelo ILRI-3D de la compañía Teledyne-Optech. Este dispositivo permite calcular distancias entre el instrumento y un objetivo de interés, en este caso, el escarpe objeto de estudio, por medio del cálculo del tiempo de vuelo desde la emisión del pulso láser hasta su recepción, posterior al rebote sobre la superficie escaneada. Los pulsos LASER de onda infrarroja (1.535 nm), por medio de un sistema de espejos internos rotatorios, realiza un barrido que permite captar los diferentes elementos que componen la superficie a analizar (Petrie & Toth, 2008).

Según las especificaciones técnicas del fabricante, la precisión del instrumento puede alcanzar los 7 mm a una distancia de 100 m en condiciones de laboratorio. Esta, se encuentra condicionada por la distancia al objetivo de interés (alcance máximo de 700 m en este caso), a la reflectividad de la superficie del objetivo y al ángulo de incidencia de los pulsos LASER (Ingensand, 2006). En superficies naturales y a mayores distancias, alcanza niveles centimétricos (Manetti y Steinman, 2007).

La información a usar en el análisis fotogramétrico, se captura mediante el uso de 2 modelos de cámaras fotográficas profesionales de alta resolución. Una cámara Nikon modelo D7200 de 24,2 megapíxeles, sensor de imagen de 23,5 x 15,6 mm y distancia focal de 35 mm (en formato de 35 mm equivalente a aproximadamente 1,5 veces la de los objetivos con un ángulo de visión de formato FX) y una cámara Sony modelo Alpha 7 RII de 42,4 megapíxeles, sensor de 35,9 x 24 mm y distancia focal de 35 mm. Las imágenes se capturan en formato RAW para posteriormente transformarlas a JPEG. Estas fotografías, serán la base para la realización de nubes de puntos densas que contengan información espacial tridimensional del escarpe y puedan ser manejadas de igual modo que las nubes de puntos LiDAR.

Para garantizar la calidad de la información, los datos deben adquirirse de la forma más óptima posible. En el caso de la información LiDAR, un parámetro muy relevante es la densidad de puntos de la nube, la cual define la resolución espacial de las variaciones detectadas y debe determinarse con base en la distancia del instrumento al escarpe escaneado. Abellán et al. (2014) presenta una aproximación sobre la adecuada adquisición de datos espaciales a partir de un LiDAR Terrestre.

Para las fotografías, se deben realizar múltiples capturas desde posiciones diferentes, con el objetivo de barrer el total de la superficie, garantizando como mínimo, una superposición entre imágenes del 50% y manteniendo el plano focal de la cámara en un ángulo lo más perpendicular posible con la superficie objetivo de estudio (Agisoft Photoscan, 2018).

En ambos casos, como menciona Royán (2015b), se debe procurar que la localización multitemporal de las estaciones instrumentales al momento de la captura de los datos, sea la misma, esto con el objetivo de evitar la generación de zonas de sombras disparejas, las cuales pueden originar errores no relacionados a cambios reales en el escarpe a la hora de compararlas.

De este modo, para lograr el cubrimiento total de la zona de estudio y el análisis temporal de los datos, para el 2018 y para el 2019 se realiza: a) 2 escaneos LiDAR desde una distancia media de 100 m, uno en la zona norte y

uno en la zona sur del escarpe, con una superposición del 35% (Tabla 1 y Figura 4a); b) Captura de 7 fotografías desde 7 posiciones diferentes con Cámara Nikon D7000 (Tabla 1 y Figura 4b); y C) Captura de 7 fotografías desde 7 posiciones diferentes con Cámara Sony Alpha 7 RII (Tabla 1 y Figura 4b).

Los datos de 2018 son obtenidos por el grupo RISK NAT en diversas campañas de campo y los datos de 2019 son obtenidos en el marco de esta investigación. En la Tabla 1, se muestran las fechas de toma de datos y su ventana temporal, y en la Figura 5, se muestran las posiciones de los instrumentos en el momento de la obtención de los datos.

Instrumento	Año: 2018		Año: 2019		Ventana temporal
	Fecha	Datos	Fecha	Datos	
LiDAR	17 de Mayo	2 escaneos	05 de Febrero	2 escaneos	9 meses
Nikon	05 de Marzo	7 fotografías	05 de Febrero	7 fotografías	11 meses
Sony	26 de Octubre	7 fotografías	05 de Febrero	7 fotografías	4 meses

Tabla 1 Fechas de adquisición de datos

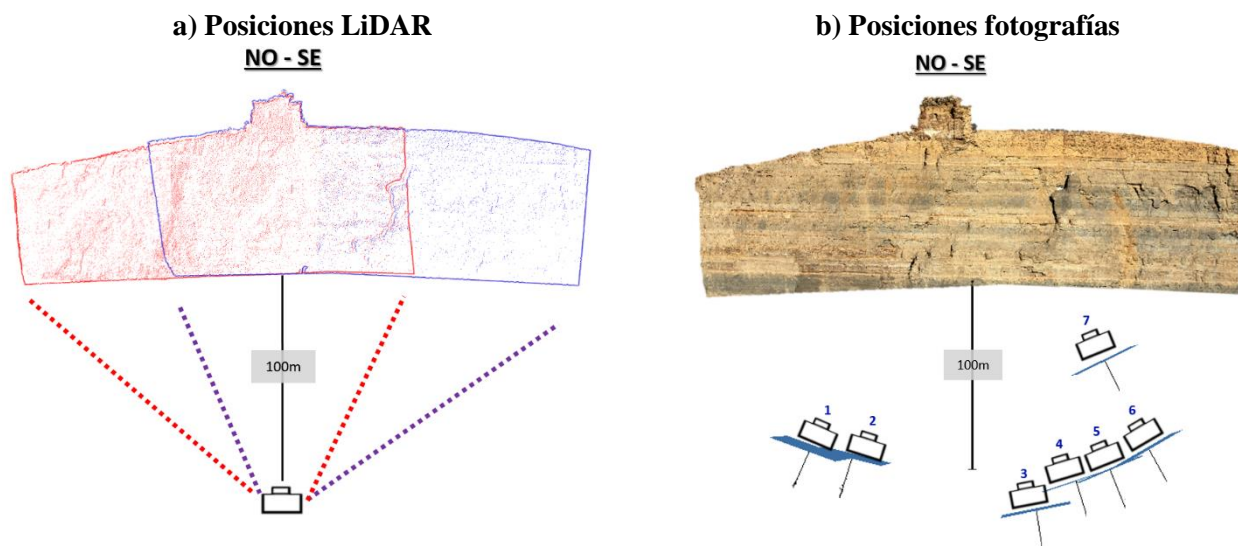


Figura 4. Posiciones de los instrumentos de adquisición de datos.

2.2 Fase 2: Tratamiento de los datos

En esta fase se recopilan, preparan e integran los datos necesarios para la identificación y cuantificación de los desprendimientos. Para ello, la metodología se basa en una modificación de metodologías empleada en investigaciones preliminares como Royán (2015b), Blanch et al (2017b) y Garcia-Badal (2018).

2.2.1 Nubes de puntos densa (Pre-Tratamiento)

El formato de salida de la información adquirida con el LiDAR terrestre, son archivos en formato *.hdr*, los cuales deben modificarse a ficheros de puntos ASCII (nubes de puntos) que contienen las coordenadas de cada punto, por medio del software Parser de Optech ILRIS-3D (Gmv.cast.uark.edu, 2018). El programa Parser procesa los datos crudos del escaneo en diferentes formatos de salida los cuales pueden ser reconocidos en GIS y programas de modelización 3D.

En el caso de la fotogrametría, las fotografías adquiridas deben procesarse con el objetivo de generar nubes de puntos tridimensionales en ficheros de puntos ASCII que puedan ser trabajados de manera homologa a las nubes de puntos LiDAR. Una vez adquiridas las fotografías en formatos JPEG, mediante el software Agisoft Metashape© (Agisoft, 2019), se aplican una serie de máscaras de trabajo que permiten filtrar información que no sea relevante para el estudio, como podría ser vegetación, cielo o cualquier otro elemento, buscando así, agilizar procesos y que el programa se centre en el reconocimiento de la información de la zona de interés.

Posteriormente, el programa busca puntos homólogos entre las fotografías, realiza una alineación entre las diferentes fotografías con solape y determina las posiciones y orientaciones relativas de las diferentes cámaras, o, en otras palabras, la localización espacial relativa desde donde se han tomado las múltiples capturas. Finalmente, con esta información, el software genera reconstrucciones tridimensionales (define formas y dimensiones) del escarpe fotografiado, a partir de las perspectivas de puntos de vista diferentes y construye las nubes de puntos densas a comparar.

2.2.2 Alineación y comparación

Una vez preparadas las nubes de puntos, se realiza una alineación de las nubes para posteriormente realizar su correcta comparación, todo por medio del software de libre acceso CloudCompare.

Tanto la alineación como la comparación de nubes, se realizan tomando como referencia una de las nubes de puntos a comparar, la cual se mantiene fija. Para las comparaciones temporales, la nube de la primera adquisición de datos se establece como la de referencia, es decir la nube de 2018.

En primer lugar, la alineación de las nubes, es un proceso que permite desplazar una nube respecto a otra, para poder minimizar la distancia entre puntos y de esta manera, localizar en igual posición, todos los puntos que la conforman.

Para ello, y como lo describe Garcia-Badal (2018), se realiza: a) Localización de puntos homólogos entre ambas nubes con la herramienta Picking de CloudCompare, se usa un error de localización inferior a 0,1 m; b) Proceso iterativo de ajuste entre las nubes por medio del algoritmo Iterative Closest Point (ICP) desarrollado por Chen y Medioni (1992), donde en cada iteración se trata de conseguir el mejor ajuste entre nubes y se eliminan puntos en los que se identifiquen cambios (deformaciones o desprendimientos) (Royan, 2015b) para que estos no influyan en el proceso y la alineación se realice con certeza de emplear los puntos que no se han movido. La búsqueda de estos puntos, se realiza por medio de la herramienta Cloud to Cloud y la asignación de un umbral de distancia definido por el usuario.

Una vez las nubes de puntos están alineadas, y con el objetivo de detectar cambios en la pared rocosa (desprendimientos o deformaciones) entre las diferentes campañas de capturas de datos, se realiza el proceso de comparación de nubes mediante el algoritmo de cálculo M3C2 (Lague, et al., 2013).

Este algoritmo agrupa conjuntos de puntos en cilindros bajo un diámetro de búsqueda definido y calcula la distancia media que hay entre planos generados con los puntos que se encuentran dentro del cilindro y que se desean comparar con la nube de puntos de referencia. Todo esto, con el fin de disminuir errores relacionados con la dispersión de puntos por valores anómalos o errores instrumentales (Lague, et al., 2013). En la Figura 5, tomada de Lague, et al., (2013), se realiza una descripción del algoritmo M3C2 y de los dos parámetros definidos por el usuario: D (escala normal) y d (escala de proyección). Esta herramienta, permite realizar comparaciones entre 2 nubes de puntos más exactas que las realizadas por medio de comparaciones punto a punto (Blanch et al. 2017).

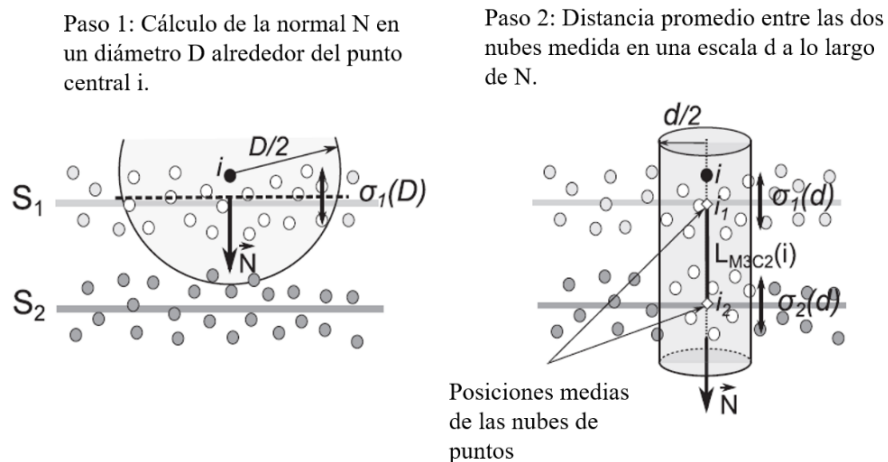


Figura 5. Configuración simple que ilustra los dos pasos del algoritmo M3C2: Paso 1: La normal se calcula a partir de la nube 1. Paso 2: 2 nubes secundarias se definen por la intersección de la referencia y se comparan nubes con un cilindro de diámetro d y eje (i, N) . Cada sub-nube se proyecta en el eje del cilindro, lo que da una distribución de distancias a lo largo de la dirección normal. Estos se utilizan para definir la posición media de cada nube i_1 e i_2 . Fuente: Modificado de Lague, et al., (2013).

El producto de estos procesos, será la adición a cada punto de la nube de puntos comparada, de un valor de diferencia respecto a la nube de puntos de referencia, denominado *Diff*. Los valores *Diff* que contengan datos positivos, son los que se interpretan como pérdidas de material y por tal razón, como posibles desprendimientos de rocas.

2.2.3 Detección de desprendimientos

Para la detección y delimitaciones de desprendimientos en el escarpe, las nubes de puntos se deben filtrar, seleccionando, agrupando y delimitando puntos de estas, que sean representativos de posibles desprendimientos.

Esto se realiza a partir de los valores *Diff* positivos, producto del paso anterior y por medio del algoritmo de búsqueda DBSCAN (*Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise*) desarrollado por Ester et al. (1996). Para esto, se emplea la metodología descrita por Tonini y Abellán (2014).

El algoritmo DBSCAN, permite hacer una selección de conjuntos de puntos, denominados clústeres, los cuales se identifican y delimitan basados en los siguientes parámetros de entrada: (a) Número mínimo de puntos (MinPts), corresponde al número mínimo de puntos vecinos que debe contener un clúster, ya que si estos puntos corresponden a un desprendimiento estarán necesariamente rodeados de otros puntos con diferencias significativas

(Miquel 2018) y (b) Radio de búsqueda (eps), corresponde a la distancia máxima alrededor de cada punto en la que se deben encontrar el mínimo número de puntos vecinos.

El algoritmo recorre toda la nube de puntos buscando en cada punto, si existen un mínimo número de puntos vecinos (a) que estén dentro del radio de búsqueda (b). En caso afirmativo, el resultado es un clúster conformado por todos los puntos que cumplen (a) y (b) (Blanch et al. 2017b). Los puntos que no pertenezcan a ningún clúster serán descartados y eliminados. Adicionalmente Todos los puntos con valores de *Diff* inferiores a 0,03 m se han ignorado para el análisis, ya que este valor representa el umbral de filtro que tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad de ruido posible y se obtiene a partir del cálculo de la desviación estándar de la distancia obtenida en la comparación de dos zonas sin movimiento (Royán, 2015b).

Los parámetros (a) MinPts y (b) eps son fijados por el usuario. Para este estudio se utiliza como número mínimo de puntos para formar un clúster 7 puntos; 0,15 m para el radio de búsqueda de las nubes LiDAR y 0,05 m para el radio de búsqueda de las nubes producto de la fotogrametría. Estas diferencias se basan en la densidad de puntos de las nubes.

Posterior a la determinación de los clústeres, se deben filtrar manualmente a criterio de experto, cuáles de estos clústeres son indicativos de desprendimientos y cuales son identificados como falsos positivos y derivan de errores instrumentales, como son los errores de borde asociados a estratificación y fracturación del macizo rocoso.

2.2.4 Cálculo de Volúmenes

Una vez definidos los desprendimientos a analizar, se debe hacer el cálculo del volumen, el cual se realiza por medio del software MATLAB (MathWorks) y se toma como referencia las pautas metodológicas propuestas por Blanch et al. (2017b) que son las siguientes: a) realización de una triangulación de todos los puntos que representan el desprendimiento, es decir que pertenecen a un mismo clúster (Figura 6a); b) cálculo del área de cada uno de los triángulos definidos en a) (Figura 6b); c) multiplicación del área obtenida en (b) por el valor máximo de diferencia *diff*(Y) de los tres puntos triangulados (Figura 6d) y (d) suma de todos los volúmenes generados para obtener el volumen total del desprendimiento identificado.

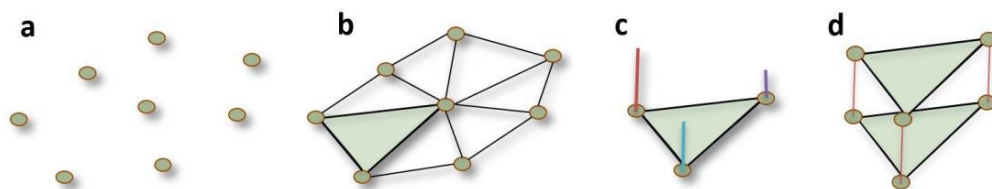


Figura 6. a) Nube de puntos. b) Triangulación y cálculo del área. c) Identificación de la *diff*(y) de cada punto (vértices). d) Cálculo del volumen a partir del área del triángulo y la *diff*(y) mayor entre los 3 vértices. Fuente: Blanch et al. (2017b)

2.3 Fase 3: Análisis

Para el análisis de la información generada, se realiza: 1) Análisis de sensibilidad y 2) Análisis cuantitativo de volúmenes de los desprendimientos identificados por medio del análisis de datos adquiridos en diferentes fechas (2018 vs 2019), con el objetivo de identificar las capacidades de cada técnica para la identificación de desprendimientos y el cálculo de volúmenes.

2.3.1 Análisis de sensibilidad

A partir de las nubes de puntos obtenidas con orígenes diferentes (LiDAR, fotogrametría con cámara Nikon y fotogrametría con cámara Sony), adquirida en una misma fecha (05 de febrero de 2019), se realiza un análisis con el objetivo de obtener el grado de sensibilidad de las diferentes técnicas de adquisición de datos empleadas, ya que estos datos, al ser adquiridos en el mismo momento, deben guardar y representar la misma información.

Para esto, se realizan todas las alineaciones posibles entre las nubes, y posteriormente se comparan por medio de la herramienta M3C2 bajo un diámetro de búsqueda de 0,2 m. El valor de corte utilizado para filtrar el ruido después de realizar la comparación es 0,03 m. Es decir, todos los puntos con valores de *Diff* inferiores a 0,03 m se han ignorado para el análisis.

Durante los procedimientos, se observa que las comparaciones ejecutadas presentan mucha dispersión en los valores *Diff* (Figura 7A) (valores representados en tonalidades azules y rojizas). Teniendo en cuenta que se están comparando dos nubes de puntos obtenidas a partir de datos adquiridos el mismo día (la pared no ha sufrido cambios), los valores *Diff* deberían ser próximos a 0 en todo el escarpe (valores representados en tonalidades verdes).

Sin embargo, producto de las diferencias entre la técnica LiDAR y la fotogrametría y entre las ópticas de las cámaras utilizadas para la adquisición de las fotografías, se observan bandeamientos y patrones de dispersión de los datos. Por tal razón, y con el objetivo de disminuir la influencia de los errores instrumentales en el proceso de alineación, se considera realizar alineaciones y comparaciones sectorizadas, tal y como se observa en la Figura 7, las cuales, mejoran el resultado de la alineación, disminuyendo considerablemente los errores de distorsión de las geometrías y curvaturas del escarpe (Figura 7B).

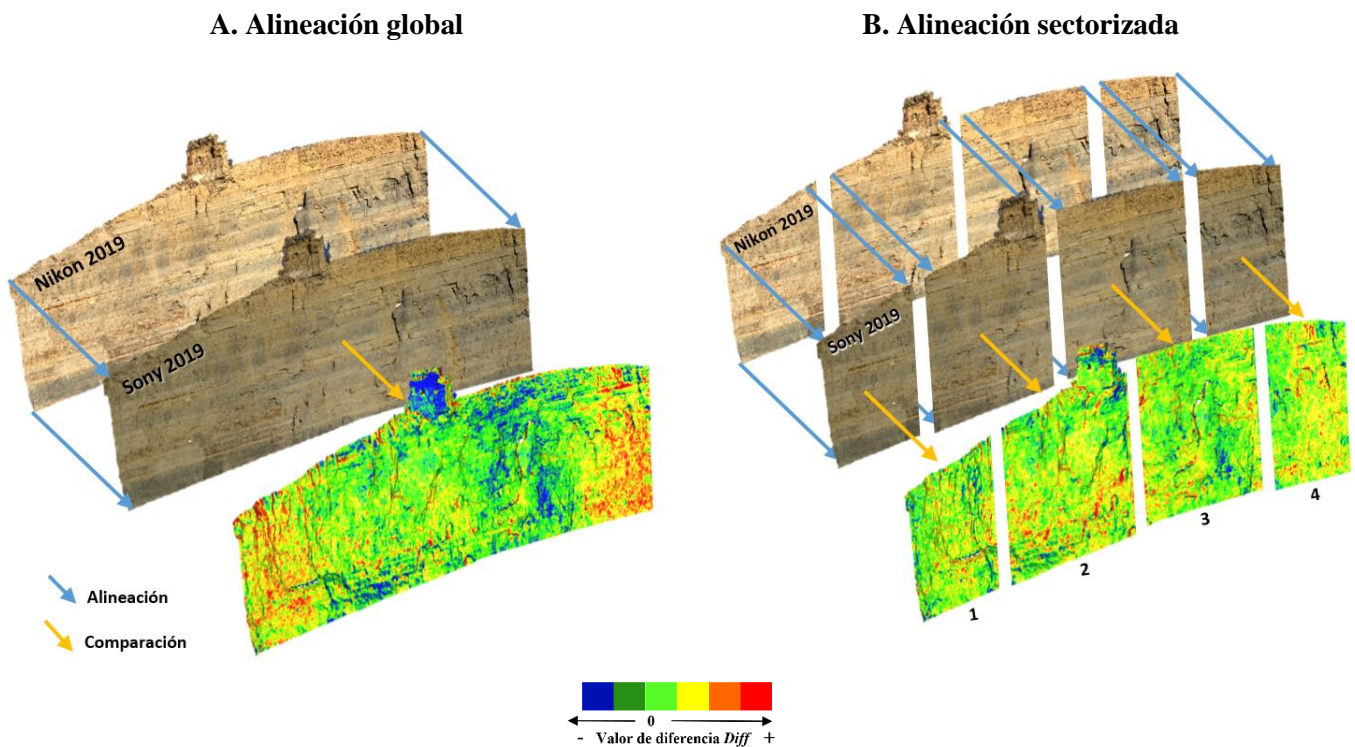


Figura 7. Diagrama esquemático de procesos de alineación global para todo el escarpe y alineación sectorizada

Teniendo en cuenta las diferencias en el número de puntos que constituye cada una de las nubes de puntos comparadas (Tabla 2), para lograr un mejor comportamiento y determinar la calidad real de las comparaciones, se realiza un ajuste en el número de puntos de las nubes de los modelos fotogramétricos por medio de un *subsampling*, con el fin de homogenizar el número de puntos de estas nubes de puntos con la adquirida con tecnología LiDAR.

2.3.2 Análisis cuantitativo de volúmenes

Mediante la comparación y análisis de datos generados en diferentes fechas (2018 vs 2019), se procede a realizar el análisis cuantitativo de volúmenes. Esto se realiza a través de: (a) Alineación y comparación global del escarpe; (b) Alineación y comparación por desprendimientos seleccionados y (c) Delimitación de desprendimientos y cálculo de volúmenes.

(a) Para un primer acercamiento al entendimiento del comportamiento y la dinámica del escarpe, se realizan las alineaciones y comparaciones globales necesarias entre los modelos de igual origen de toda la zona en estudio, por medio de la herramienta M3C2 y bajo un diámetro de búsqueda de 0,2 m. Adicional a las alineaciones globales del escarpe y observando los buenos resultados de las alineaciones sectorizadas, se realiza el mismo ejercicio que en el análisis de sensibilidad al alinear por sectores, lo cual permite una disminución de errores de dispersión de los datos en el momento de realizar las comparaciones. Esta sectorización, se realiza dividiendo el escarpe en 4 partes iguales. El valor de corte utilizado para filtrar el ruido después de realizar la comparación es 0,03 m. Se toma como referencia las nubes de puntos obtenidas en 2018.

(b) Basados en el análisis del paso anterior y en la disminución de errores de dispersión de los datos en las comparaciones por medio de alineaciones sectorizadas, con el objetivo de reforzar una correcta alineación de las nubes de puntos de igual origen, se realizan nuevas alineaciones y comparaciones en 5 desprendimientos de roca seleccionados de interés en la zona de estudio.

Se escogen estos 5 desprendimientos debido a que, por una parte, están presentes en todas las comparaciones (a), tienen volúmenes muy diferentes, lo cual permite comparar si la diferencia entre modelos está sujeta a la magnitud o a la escala de los desprendimientos, y por último, están situados en diferentes zonas del escarpe.

La comparación de las nubes de puntos se realiza por medio de la herramienta M3C2 bajo dos diámetros de búsqueda diferentes. En primer lugar, una comparativa bajo un diámetro de búsqueda de 0,2 m para las nubes de origen LiDAR y fotogrametría Nikon y Sony, con el objetivo de tener una comparación homogénea y bajo parámetros uniformes con todos los modelos. Adicionalmente, las nubes de puntos de origen fotogramétrico, tanto Nikon como Sony, permiten realizar comparaciones con diámetros de búsqueda de 0.1m debido al elevado número de puntos que la componen, lo cual permite generar una mejor definición y delimitación de las geometrías de los desprendimientos, y lograr así, obtener la calidad y alcance real de estas herramientas.

Durante los procedimientos y análisis de los resultados de las alineaciones y comparaciones por desprendimientos seleccionados, en el desprendimiento No.2 se observan fuertes irregularidades y definición anómala del desprendimiento. Por tal razón, para lograr una mejor definición y delimitación del desprendimiento y determinar así la calidad real de las comparaciones, se realiza una inversión en la nube de referencia en el momento de ejecutar la herramienta M3C2 en este desprendimiento, por consiguiente, las comparaciones en este desprendimiento, se realizan tomando como referencia la nube de puntos de fecha 2019. Esto, define mucho mejor la geometría del desprendimiento.

(c) Una vez definidas las correctas alineaciones de las nubes en los desprendimientos seleccionados y las comparaciones efectuadas, se ejecuta el algoritmo de detección de clústeres, a partir del cual, se obtiene la geometría de los desprendimientos a las cuales se realiza el cálculo de los volúmenes.

En el proceso de definición de las geometrías de los desprendimientos, previo al cálculo de los volúmenes, se identifica que las geometrías de algunos desprendimientos en las comparaciones son diferentes. A causa de tener con Sony una ventana temporal menor, las comparaciones Nikon y LiDAR, detectan desprendimientos mayores debido a la superposición de eventos, los cuales se generaron fuera del periodo de observación Sony. Por este motivo, se usa la configuración de las geometrías identificadas en las comparaciones Sony, para perfilar los otros, e individualizar así, los eventos superpuestos.

3 Resultados

3.1 Nubes de puntos densas

El producto de la generación de nubes de puntos por medio del programa Agisoft PhotoScan© a partir de datos fotogramétricos, se muestran en la Tabla 2 A y B. Adicionalmente, se muestra el número de puntos que componen la nube obtenida por medio de tecnología LiDAR, posterior al proceso de pre-tratamiento (Tabla 2 C).

<i>Origen</i>	A) Nikon		B) Sony		C) LiDAR	
<i>Fecha</i>	17/03/2018	05/02/2019	05/03/2018	05/02/2019	26/10/2018	05/02/2019
<i>Número de puntos/nube</i>	9.817.012	10.686.747	3.561.340	8.861.697	706.097	519.277

Tabla 2 Información nubes de puntos densas.

3.2 Análisis de sensibilidad

Los resultados del análisis de sensibilidad de las nubes de puntos obtenidas con orígenes diferentes (LiDAR, fotogrametría con cámara Nikon y fotogrametría con cámara Sony) adquirida en una misma fecha (05 de febrero de 2019), se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 8 .

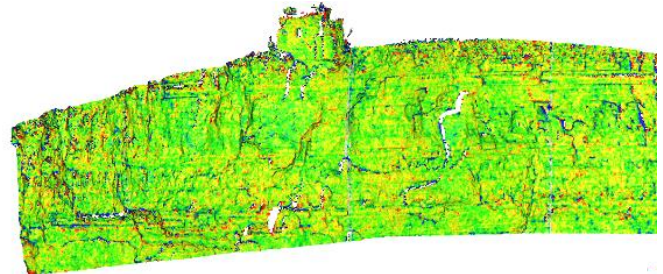
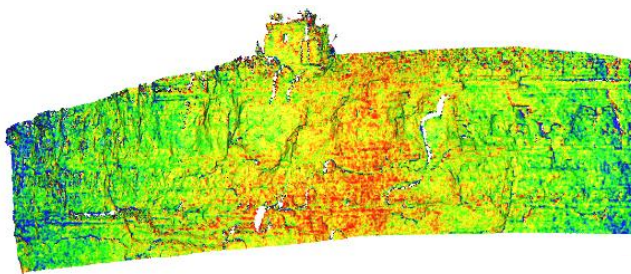
	Desviación estándar (m)					
	Alineación global sin sectorizar	Alineación Sectorizada				
		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Global
Nikon vs LiDAR	0,035	0,037	0,021	0,015	0,016	0,021
Sony vs LiDAR	0,038	0,035	0,024	0,017	0,018	0,023
Sony vs Nikon	0,019	0,014	0,016	0,017	0,014	0,015

Tabla 3 Desviaciones estándar de las comparaciones realizadas por medio de alineaciones globales y alineaciones sectorizadas

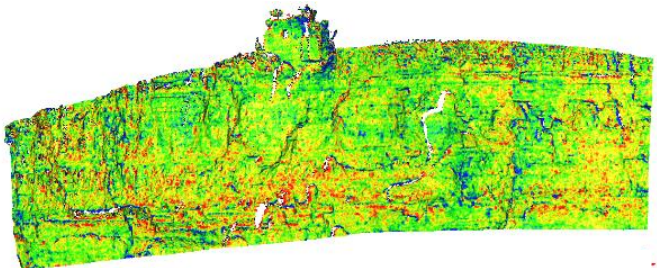
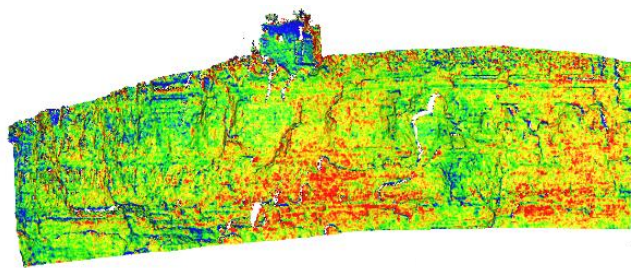
A. Alineación y comparación global sin sectorizar

B. Alineación y comparación sectorizada

Nikon vs LiDAR



Sony vs LiDAR



Nikon vs Sony

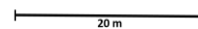
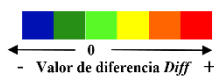
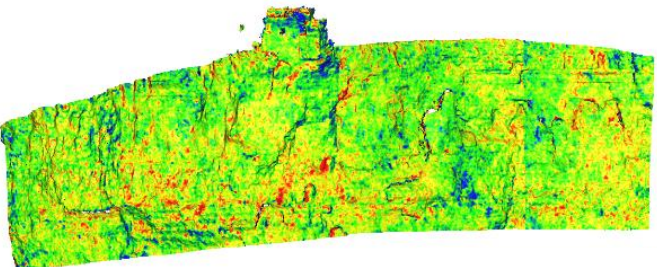
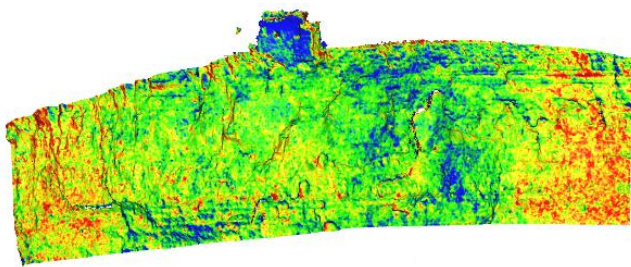


Figura 8. Análisis de sensibilidad por medio de todas las comparaciones posibles en los modelos adquiridos en la misma fecha. La columna A representa las comparaciones realizadas por medio de alineaciones globales y la columna B alineaciones sectorizadas.

3.3 Análisis cuantitativo de volúmenes

Por medio de la comparación y análisis de los modelos generados en diferentes fechas (2018 y 2019), estos son los resultados obtenidos:

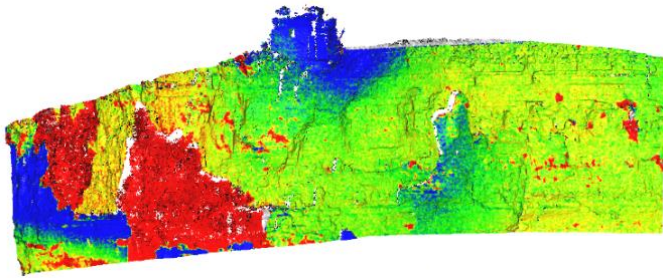
3.3.1 Alineación y comparación global del escarpe

Los resultados de la alineación y comparación global del escarpe se observan en la Figura 9.

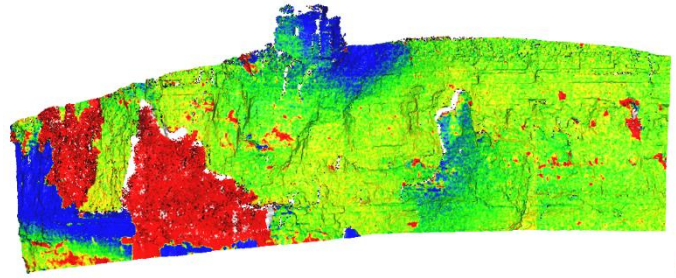
A. Alineación y comparación global sin sectorizar

B. Alineación y comparación sectorizada

LiDAR 2018 vs LiDAR 2019

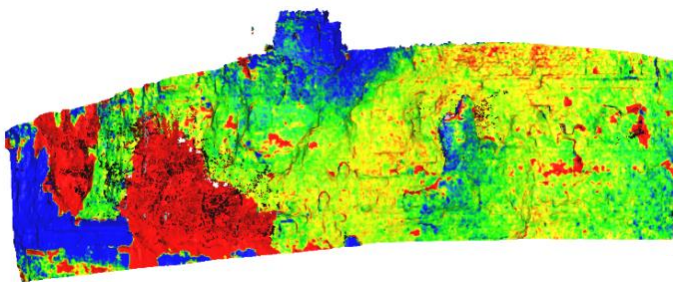


Desviación estándar: 0,434 m

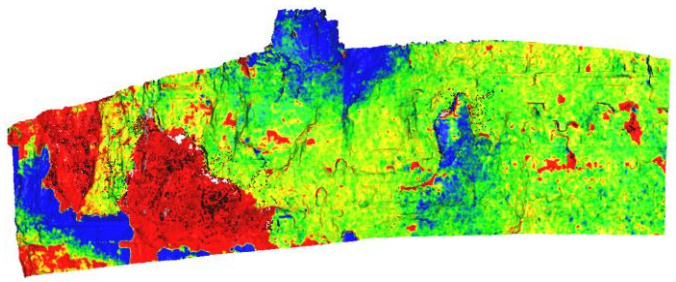


Desviación estándar: 0,416 m

Nikon 2018 vs Nikon 2019

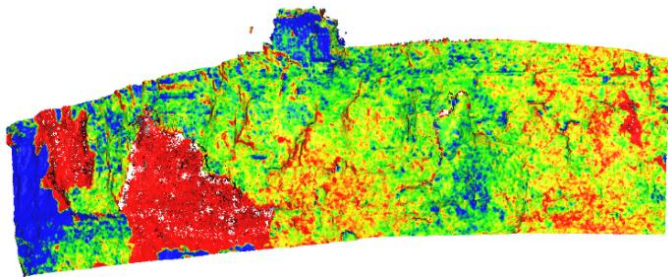


Desviación estándar: 0,457 m

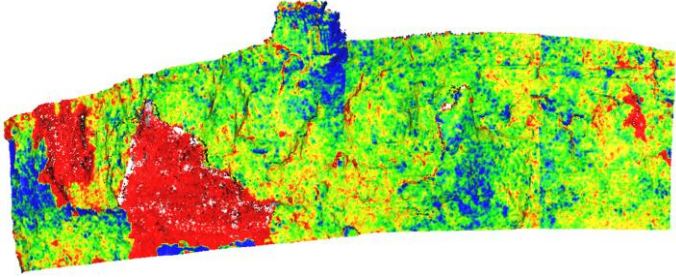


Desviación estándar: 0,426 m

Sony 2018 vs Sony 2019



Desviación estándar: 0,471 m



Desviación estándar: 0,446 m

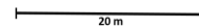
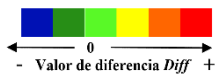


Figura 9 Alineaciones y comparaciones temporales entre los modelos de igual origen.

En general, con las comparaciones temporales de las nubes de puntos, lo que se identifica, es la dinámica o estabilidad de los sectores del escarpe y las geometrías de los materiales en el 2019 respecto a su posición original en el 2018. Por tal razón, teóricamente, se encuentran representadas 3 situaciones: 1) Zonas estables, en las cuales no se identifica actividad o movimiento aparente alguno, las cuales están representadas en las imágenes por tonalidades verdes; 2) Zonas inestables con valores de diferencia positivos, en las cuales existe ausencia de materiales en el 2019 que si se identifican en el 2018, estas zonas, representadas en tonalidades rojas, se interpretan como zonas de desprendimientos de rocas; y 3) Zonas inestables con valores de diferencia negativos, donde la posición de la pared en el 2019 se encuentra a una menor distancia respecto al dispositivo de toma de datos que en el 2018, estas zonas, representadas en tonalidades azules, se interpretan como zonas de deformación.

3.3.2 Alineación y comparación por desprendimientos seleccionados

Los resultados de la alineación y comparación por desprendimientos se observan en la Figura 10. En total, se realizan 5 comparaciones temporales del estado del escarpe en el 2019 tomando como referencia el estado del escarpe en el 2018 para 5 diferentes desprendimientos seleccionados.

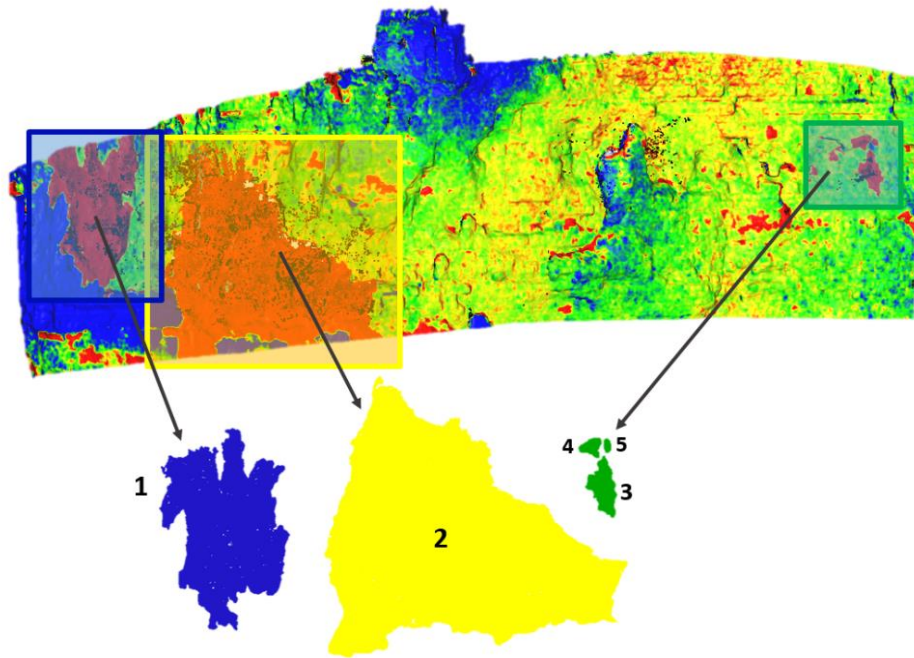


Figura 10 Desprendimientos seleccionados para alineaciones y comparaciones para cálculo de volúmenes.

3.3.3 Delimitación de desprendimientos y cálculo de volúmenes

Los resultados de la delimitación de desprendimientos y los cálculos de volúmenes de los 5 desprendimientos seleccionados, se muestran en la Tabla 4.

		Desp. No. 1	Desp. No.2	Desp. No.3	Desp. No.4	Desp. No.5
LiDAR 0.2	Vol (m³)	29,560	162,110	0,751	0,134	0,011
	% error vs LiDAR	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Nikon 0.1	Vol (m³)	28,760	160,450	0,615	0,144	0,010
	% error vs LiDAR	2,7%	1,0%	18,1%	7,5%	6,7%
Nikon 0.2	Vol (m³)	25,940	150,260	0,549	0,139	0,010
	% error vs LiDAR	12,2%	7,3%	26,9%	4,0%	9,4%
Sony 0.1	Vol (m³)	25,233	173,260	0,825	0,152	0,012
	% error vs LiDAR	14,6%	6,9%	9,8%	13,8%	4,2%
Sony 0.2	Vol (m³)	23,072	162,430	0,737	0,144	0,011
	% error vs LiDAR	21,9%	0,2%	1,8%	7,7%	1,1%

Tabla 4 Volúmenes calculados por medio de las comparaciones temporales.

4 Discusión

4.1 Análisis de sensibilidad

Durante los procedimientos de manejo de las nubes de puntos para realizar los respectivos análisis objeto de estudio, se observa que las comparaciones ejecutadas por medio de alineaciones y comparaciones globales de todo el escarpe, presentan mucha dispersión en los valores *Diff*, a causa de distorsiones en las nubes de puntos fotogramétricas. Por tal razón, para contrarrestar una parte de los errores generados por estas distorsiones de óptica, en lugar de analizar las alineaciones y comparaciones globales, se realiza por medio de las alineaciones y comparaciones desarrolladas al sectorizar el escarpe. La disminución en la dispersión de los datos se ve reflejada en los cambios de valores de desviación estándar de la Tabla 3, al pasar de una alineación y comparación global sin sectorizar a una alineación y comparación global sectorizada.

La disminución de errores de distorsión de las geometrías y curvaturas del escarpe se logra debido a que, entre menor sea el área a alinear, menos esfuerzo requiere el software para lograr el ajuste ideal de todos los puntos de las nubes. Sin embargo, estos sectores deben ser proporcionales al tamaño de los desprendimientos que se desea alinear y evitar seccionarlos en dos alineaciones diferentes.

Por medio de los resultados observados en el análisis de sensibilidad, posterior a las alineaciones y comparaciones sectorizadas, se identifican 2 situaciones: 1) Las nubes generadas a partir de información LiDAR e información fotogramétrica con cámara Nikon, presentan comportamientos similares y las dispersiones de los datos son bajas; y 2) En el caso de las nubes de puntos obtenidas a partir de información fotogramétrica con cámara Sony, difieren más a las nubes generadas a partir de información LiDAR, se observan mayores errores de dispersión en los resultados, en los cuales, las alineaciones y comparaciones sectorizadas, que se usa como estrategia para la minimización de estos, no muestra correcciones considerables.

Las variaciones en los resultados de las comparaciones de las nubes de puntos fotogramétricas, son producto de las diferencias ópticas de los sistemas e instrumentos que obtienen la información y de la posterior representación digital de los datos obtenidos de geometrías y dimensiones del escarpe.

Al examinar la información técnica de las cámaras con que se realizan las fotografías, se observa que estas tienen diferentes ángulos de captura, por una parte, la cámara Nikon presenta un sensor de imagen de 23,5 x 15,6 mm y distancia focal de aproximadamente 35 mm (52,5 en formato de 35 mm equivalente) y por otra la cámara Sony cuenta con un sensor de 35,9 x 24 mm y distancia focal de 35 mm. Las fotografías producto de la cámara Sony, presentan una óptica más angular que las Nikon, por lo que la cobertura de visión y captura es mucho más amplia. En otras palabras, en una fotografía Sony se alcanza a capturar casi la totalidad del escarpe, mientras que con las fotografías Nikon, debemos al menos hacer 2 capturas diferentes (Figura 11), por tal razón, se tendrán diferentes distorsiones y representaciones de la realidad.

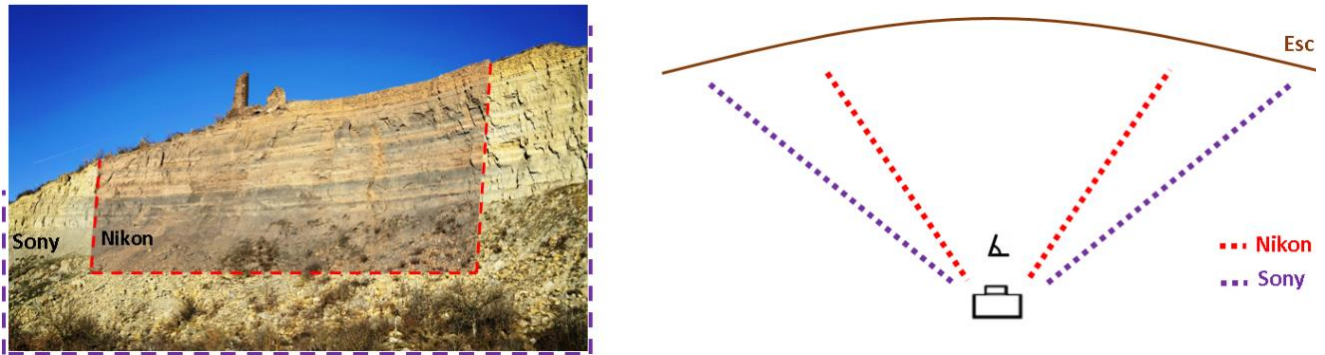


Figura 11 Representación diferentes ángulos de captura de las cámaras fotográficas.

En el manual de uso de Agisoft Metashape© (Agisoft, 2019), se hace mención a evitar el uso de lentes de gran ángulo y se recomienda como mejor opción, el uso de lentes con distancia focal de 50 mm en formato de 35 mm equivalentes), un ángulo de visión muy cercano a la visión real.

Por lo tanto, por una parte, tenemos que los modelos fotogramétricos producto de la cámara Sony serán más grandes, y esta generación de modelos más grandes, da mucha más libertad a generar distorsiones en la representación de las geometrías capturadas, y por otro lado, la óptica de la cámara Nikon, que es una óptica más parecida a nuestra visión real y la recomendada por Agisoft Metashape© (Agisoft, 2019), lo cual favorece la disminución de estas distorsiones en el momento de la generación de los modelos digitales.

Esto, es un elemento clave a la hora de entender la calidad de las nubes de puntos, la dispersión de los datos y la precisión a la hora de detallar geometrías. Con las cámaras Sony, aunque se tengas más megapíxeles y una mejor resolución y cobertura a la hora de tomar las fotografías, también se adiciona más distorsión al sistema y por ende una disminución en la calidad de los modelos, lo cual no aporta a una mejor definición de las geometrías. Con las fotografías de la cámara Nikon, aunque se cuente con menos megapíxeles de resolución, se usa un lente con la distancia focal óptima para creación de modelos de excelente calidad.

Respecto a la comparación de las nubes de puntos fotogramétrica con cámara Nikon y cámara Sony, por medio de los resultados observados en los valores de desviación estándar en el análisis de sensibilidad, se identifica que la dispersión de los datos es mucho más baja, con valores de hasta 0,014 m, que cuando se realizan comparaciones de estas nubes de puntos fotogramétricas con la nube de puntos LiDAR.

Este resultado es interesante, ya que permite interpretar que la técnica de generación de nubes de puntos tridimensionales por medio de fotogrametría, resuelve de igual forma las geometrías y sus deformaciones, independiente de los datos de entrada (fotografías) y genera un modelo diferente a la de otra técnica de adquisición como es el LiDAR. En otras palabras, si los datos se trabaja bajo el mismo flujo de trabajo, las semejanzas o diferencias que se presenten entre las nubes de puntos generadas, serán el resultado de las características de los instrumentos de captura de las fotografías, en este caso las cámaras Nikon y Sony (Figura 12).

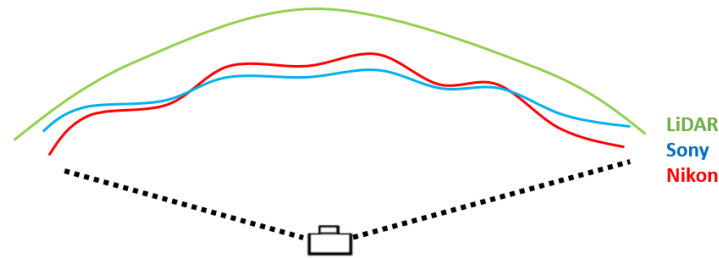


Figura 12 Diagrama esquemático de las diferentes distorsiones entre LiDAR, Nikon y Sony.

4.2 Análisis cuantitativo de volúmenes

En primer lugar, para el análisis cuantitativo de los volúmenes de los desprendimientos, por medio de las alineaciones y comparaciones de las diferentes nubes de puntos en el escarpe (Figura 9), se observa que las comparaciones entre las nubes de puntos LiDAR y las comparaciones entre las nubes de puntos fotogramétricas con cámara Nikon, muestran unas superficies muy limpias y suavizadas en los sectores estables como se observa en la zona central en tonalidades verdes y una clara identificación de zonas inestables como lo son las deformaciones de la pared de una antigua estructura localizada en la zona superior del escarpe y la deformación bajo el desprendimiento del extremo izquierdo del escarpe en tonalidades azules.

Visualmente, estos dos modelos presentan comportamientos muy similares. Sin embargo, el modelo Sony, presenta mayor dispersión de datos que los modelos anteriores, no se identifica claramente las zonas de deformación de la pared localizada en la zona superior del escarpe ni la zona del sector izquierdo. Adicionalmente se observa una tendencia de bandeamientos casi verticales de intercalaciones de zonas de tonalidades azules a tonalidades rojas. Los errores de borde de las geometrías, lo cuales se refieren a la disminución de definición en zonas de quiebres como bordes o esquinas, se encuentran más acentuados. En este modelo, las alineaciones sectorizadas no corrigen todos los errores de dispersión de datos.

En todas las comparaciones, se identifica con claridad 2 grandes desprendimientos (desprendimientos No. 1 y 2) en la mitad izquierda del escarpe, con geometrías y dimensiones muy similares, representados en tonalidades rojas.

En el desprendimiento No.2 se observa una situación en particular, el bloque de rocas caído, previo a desprenderse, presenta una deformación muy acentuada en la parte superior del conjunto de rocas que componen el bloque caído y una deformación progresivamente menor en la parte baja, situación que se manifiesta mediante una gran separación del bloque en la parte superior respecto a la pared del escarpe a la cual se encontraba adherida.

Esta dinámica se encuentra asociada a la presencia de grietas de tensión subparalelas a la cicatriz del escarpe de coronación, las cuales son muy común en este tipo de escarpes y son el principal factor condicionante de las caídas de mayor magnitud, ya que intensifican los procesos geomorfológicos y la inestabilidad del sector (Blanchard et al. 2008). Adicionalmente, el estilo de deformación muy acentuada en la parte superior y más baja en la parte inferior del bloque, es característica al tipo de mecanismo de acción dominante que genera los desprendimientos de roca en este escarpe, que como se menciona en el apartado 1.2, Royán et al. (2015a) estableció como de tipo vuelco o *rock toppling*, en el cual, los bloques inestables rotan a partir de un eje situado en la parte baja (Goodman & Bray, 1976; Hoek & Bray, 1981).

La separación de este bloque, además de generar algunos problemas en la definición de la geometría, adiciona un error de cálculo al volumen del desprendimiento, sobredimensionando la magnitud del bloque caído, producto de

la continua deformación. Sin embargo, y como se observa en la Tabla 4, este desprendimiento es el que menos dispersión de datos presenta en todos los cálculos de volúmenes, por lo cual, la sobredimensión del volumen real del bloque desprendido, se estima tanto con las nubes de puntos LiDAR como con las nubes de puntos fotogramétricas.

Respecto al cálculo de volúmenes de los desprendimientos, se calculan valores desde 0.010 m^3 hasta 173.260 m^3 , en los cuales, tomando como referencia los resultados de datos para el modelo LiDAR, los errores de cálculo varían desde es un mínimo de 1% a un máximo de 27%.

Para todo el conjunto de valores calculados, aunque no existe una línea clara de comportamiento ni un patrón de distribución de la dispersión de los datos, se identifica que los desprendimientos que menos dispersión de datos presentan, son los No. 2, 4 y 5 con porcentajes de error desde 0,1% a 13,8% respecto al volumen calculado a partir de las nubes de puntos LiDAR.

En principio, y basado en la resolución de las variaciones detectadas, la dispersión de datos se creía asociada al tamaño de los desprendimientos, relacionando que entre mayor sea la magnitud del desprendimiento más clara la delimitación del mismo. Sin embargo, estos 3 desprendimientos con bajos porcentajes de error en los cálculos, están caracterizados por tener unas geometrías sencillas, a diferencia de los desprendimientos 1 y 3, los cuales tienen una geometría muy irregular, con presencia de fuertes bordes, curvaturas y angulosidades (Figura 10).

Adicionalmente, los volúmenes que más se aproximan a los calculados por medio de las nubes de puntos LiDAR, son los cálculos realizados a partir de las nubes de puntos fotogramétricas con cámara Nikon, realizados con diámetro de búsqueda de 0,1 m en la comparación M3C2, los cuales, en el caso de la fotogrametría, definen de mejor forma las geometrías de los desprendimientos que las comparaciones realizadas por medio de diámetros de búsqueda de 0.2m.

Por tal razón, aunque los errores observados en los cálculos de volúmenes, también se deben ver influenciados en parte por errores instrumentales, por el proceso metodológico y posiblemente también en parte por el tamaño de los desprendimientos, la correcta definición de las formas y geometrías para la delimitación de los desprendimientos es fundamental para la cuantificación de la magnitud de estos.

Con la fotogrametría se ha identificado que, si los desprendimientos son geometrías complejas, con irregularidades, múltiples curvaturas y angulosidades, es probable que se generan variaciones en la iluminación y sombras laterales en el escarpe, que, en el momento del procesamiento de las fotografías, disminuye la definición y el desprendimiento no se delimita correctamente. Errores que no se presentan al definir geometrías con tecnología LiDAR.

Por otra parte, respecto a las nubes de puntos fotogramétricas con cámara Sony, aunque inicialmente, por medio del análisis de sensibilidad (Figura 8 y Tabla 3) y análisis visual de las alineaciones y comparaciones del escarpe (Figura 9), se observa que las comparaciones de estas nubes de puntos tienen una mayor dispersión de los valores *Diff*, el cálculo de volúmenes no supone una generación de errores significativos, ya que al final, se obtienen unos valores de volúmenes equiparables a los que se obtienen con el LiDAR.

Sin embargo, en este estudio, es claro que las nubes de puntos tridimensionales generadas por medio de fotogrametría con cámara Sony, presentan una menor calidad que las nubes de puntos fotogramétricas con cámara Nikon. Como se observa en la Tabla 2, en los valores de los puntos que componen cada una de las nubes empleadas, la nube de puntos Sony del 2018 contiene un total de 3.561.340, siendo apenas el 40.2% de la nube de puntos Sony de 2019, la cual contiene 8.861.697 puntos. Esta disminución en la calidad de las fotografías, aunque no fue posible

identificar puntualmente la causa, puede obedecer a múltiples factores como los parámetros de captura la cámara o la posición de las sombras o iluminación en el momento de toma de los datos. Por tal razón, los resultados de los cálculos de volúmenes obtenidos con esta cámara no son concluyentes.

Para finalizar, la caracterización espacial, temporal y de intensidad de desprendimientos de roca es la línea base a seguir a la hora de calcular peligrosidad por este tipo de fenómenos. Para esto, es fundamental la disponibilidad de inventarios de eventos, a través de los cuales, se puedan establecer, tanto relaciones directas entre la frecuencia de ocurrencia y eventos detonantes, como análisis magnitud-frecuencia.

La fotogrametría, debido al bajo costo de adquisición y desarrollo y a la portabilidad de los instrumentos, relativo a otros sistemas de caracterización y monitoreo de desprendimientos como la tecnología LiDAR, permite realizar sistemas *in situ* y automatizados de adquisición de datos en remoto, que permiten un monitoreo a tiempo casi real, capaces de obtener de manera periódica capturas de datos en sectores de interés y mejorar considerablemente la resolución temporal de los eventos.

Adicional a esto, por medio de los resultados obtenidos en esta investigación, se identifica que la fotogrametría nos permite obtener nubes de puntos, que, aunque se debe buscar formas de mejorar las delimitaciones e identificar los elementos que hacen que no se definan adecuadamente los desprendimientos, es capaz de obtener datos equiparables a los que se obtienen por medio de tecnología LiDAR. Por tal razón, el profundizar en el desarrollo de este tipo de herramientas y sistemas permitirá el avance en la detección, caracterización y monitoreo de desprendimientos de roca.

5 Conclusiones

Como se ha visto, todos los sistemas de creación de nubes de puntos tridimensionales generan algún tipo de distorsión de la realidad, incluyendo el sistema LiDAR, lo cual, en la práctica, no permite una alineación 100% exacta entre las nubes a comparar y por tal razón, se observan dispersiones en los resultados de las comparaciones. Por tal razón se deben implementar herramientas y procedimientos que procuren minimizar y neutralizar estos al máximo. La estrategia de sectorizar y disminuir el tamaño de las nubes de puntos a la hora de alinear y comparar, evitando mayores curvaturas y elongaciones y un mejor acoplamiento de una nube respecto a otra, responde favorablemente a la hora de disminuir la dispersión de los datos.

La técnica de generación de nubes de puntos tridimensionales por medio de fotogrametría, resuelve de igual forma las geometrías y sus deformaciones, independiente de los datos de entrada (fotografías), por tal razón, las semejanzas o diferencias que se presenten entre las nubes de puntos generadas, serán el resultado de las características de los instrumentos de captura de las fotografías.

Por medio de los resultados observados en el análisis de sensibilidad, se identifica que la comparación de la nube generada a partir de información LiDAR con la nube de puntos de información fotogramétrica con cámara Nikon, presentan más similitudes y menos dispersión de datos que la comparación entre la nube de puntos LiDAR y la nube de puntos fotogramétrica con cámara Sony. Estas variaciones en los resultados de las comparaciones de las nubes de puntos fotogramétricas, son producto de las diferencias ópticas de las cámaras. Con las cámaras Sony, aunque se tengas más megapíxeles y una mejor resolución y cobertura a la hora de tomar las fotografías, también se adiciona más distorsión al sistema y por ende una disminución en la calidad de los modelos, lo cual no aporta a una mejor definición de las geometrías. Con las fotografías de la cámara Nikon, aunque se cuente con menos megapíxeles de resolución, se usa un lente con la distancia focal óptima para creación de modelos de excelente calidad.

Basados en el análisis de los volúmenes de los desprendimientos, se concluye que los errores de cálculo observados se asocian principalmente a la correcta definición de geometrías y delimitación de los desprendimientos. Con la fotogrametría se identifica que, si los desprendimientos son geometrías complejas, con irregularidades, múltiples curvaturas y angulosidades, disminuye la definición y el desprendimiento no se delimita correctamente.

Sin embargo, las nubes de puntos de origen fotogramétrico con cámara Nikon, permiten realizar comparaciones con diámetros de búsqueda de 0.1m debido al elevado número de puntos que las componen (9.817.012 y 10.686.747), lo cual genera una mejor definición y delimitación de las geometrías de los desprendimientos, y lograr así, resultados en el cálculo de volúmenes más próximos a los calculados por medio de las nubes de puntos LiDAR.

Finalmente, la fotogrametría, una técnica con muchas ventajas y con un costo excesivamente menor que el LiDAR, aporta resultados equiparables a los que se obtienen por medio de tecnología LiDAR.

6 Agradecimientos

A la Universidad de Barcelona por permitirme hacer parte de ella; a la Facultad de Ciencias de la Tierra, su planta docente y administrativa por todos los conocimientos brindados; A Marta Guinau y Xabier Blanch por darme la oportunidad de trabajar con ellos, guiarme en esta investigación y agradecer enormemente su dedicación, paciencia, confianza y respaldo. Al grupo de investigación RISKNAT, a David García y Glòria Furdada por el acompañamiento en la salida de campo al escarpe de Puigcercós y por la colaboración prestada. Finalmente agradecer a mi familia, mis padres y mis hermanas por ser un apoyo incondicional; a mis amigos y compañeros. Gracias.

7 Referencias

- Abellan, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., & Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, no. 119, pp. 162-171.
- Abellan, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M., & Lato, M. J. (2014). Terrestrial Laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, no. 39, pp. 80-97.
- Agisoft. (2019). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5*. Copyright © 2019 Agisoft LLC, pp 1-145.
- Blanch, X., García-Sellés, D., Guinau, M., & Royán, M. J. (2016). Rockfall source areas detection and characterization from Terrestrial Laser Scanner (TLS) data. *Proceedings of the 2nd Virtual Geoscience Conference*, pp. 128 - 129.
- Blanch, X., Guinau, M., & Royán, M. J. (2017). Caracterización geomorfológica y estructural de zonas de salida de bloques en una pared rocosa afectada por desprendimientos. *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, pp. 557 - 568.
- Blanch, X., Guinau, M., & Royán, M. J. (2017b). Análisis de la evolución de desprendimientos a partir de datos LiDAR en el escarpe de Puigcercós (Pallars Jussà – Cataluña). *IX Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables. 27-30 junio 2017 Santander*, pp. 504 - 515.

- Blanchard, J., Calvet, J., Abellán, A., García, D., Khazaradze, G., & Vilaplana, J. M. (2008). Estudio del escarpe del deslizamiento de Puigcercós mediante láser escáner terrestre. Conca de Tremp, Catalunya. *Geotemas*, vol. 10, pp. 1389-1392.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., . . . Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2, pp. 57-72. <https://doi.org/10.5194/nhess-2-57-2002>.
- Chen, Y., & Medioni, G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. *Images Vis Comput, Volum 10*, pp. 145-155.
- Copons, R. (2008). El risc d'esllavissades a Catalunya. *RISKAT*, pp. 1-35.
- Corominas, J., & Alonso, E. (1984). Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán. *Ponencias y comunicaciones - ETSICCP-UPC*, pp. C.1 - C.53.
- Cuevas, J. L. (1992). Estratigrafía del "Garumniense" de la Conca de Tremp. Prepirineo de Lérida. *Acta Geológica Hispánica*, no. v.27, pp. 95-108.
- Erismann, H. T., & Abele, G. (2001). *Dynamics of rockslides and rockfalls*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 316.
- Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 226-231.
- Garcia-Badal, M. (2018). Millora metodològica per a la detecció i caracterització de desprendiments amb dades de LiDAR Terrestre a la Muntanya de Montserrat. *Treball Final de Màster, Universitat de Barcelona.*, pp. 1-55.
- Gmv.cast.uark.edu. (2018). *Optech ILRIS-3D Parser: Pre-Processing Scan Data | Geospatial Modeling & Visualization*. Obtenido de <http://gmv.cast.uark.edu/scanning/hardware/optech-ilris-3d/checklist-optech-ilris-3d/optech-ilris-parser-pre-processing-scan-data/> [Accessed 10 Abril 2019]
- Goodman, R. E., & Bray, J. W. (1976). Toppling of Rock Slopes. *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, ASCE, Vol 2*, pp. 201-234.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering Third Edition*. CRC Press. pp. 368.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, vol. 11, pp. 167-194.
- Ingensand, H. (2006). Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. *in 3rd IAG/ 12th FIG Symposium Baden, May 22-24*, pp. 1-10.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Nat. Hazards*, 61(1), pp. 5–28, doi:10.1007/s11069-010-9634-2.
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol 82, pp. 10–26.

- Manetti, L., & Steinman, G. (2007). 3DeMoN ROBOVEC - Integration of a new measuring instrument in an existing generic remote monitoring platform. *7th*, pp. 1–12.
- Matías, J. (2013). Técnicas de fotogrametría y visión por computador para el modelado 3D de estructuras geomorfológicas dinámicas. *Tesis Doctoral, Universidad de Extremadura, Departamento de Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos*, pp. 155.
- Petrie, G., & Toth, C. (2008). Introduction to laser ranging, profiling and scanning. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, pp. 1-28.
- Portilla, M., Chevalier, G., & Hürlimann, M. (2010). Description and analysis of the debris flows occurred during 2008 in the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 10, pp. 1635-1645. doi: 10.5194/nhess-10-1635-2010.
- Royán, M. J. (2015b). Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR Terrestre. *Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona*, pp. 246.
- Royán, M. J., Abellán, A., & Vilaplana, J. M. (2015a). Progressive failure leading to the 3 December 2013 rockfall at Puigcercós scarp. (Catalonia, Spain). *Landslides*, pp. 585-595.
- Royán, M. J., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J. M., & Calvet, J. (2014). Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, Vol 11, no. 4, pp. 697–709.
- Tonini, M., & Abellán, A. (2014). Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: A clustering approach using R, *J. Spat. Inf. Sci.*, 8, pp. 95–110, doi:10.5311/JOSIS.2014.8.123.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides, analysis and control.*, pp. 11-33.
- Vidal, L. M. (1881). Nota acerca de los hundimientos ocurridos en la Cuenca de Tremp (Lérida) en Enero de 1881. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, no. VIII, pp. 113-129.
- Whalley, W. B. (1984). Rockfalls. *in Slope Instability, edited by D. Brundsen and P. D. B, Wiley, Chichester*, pp. 217 – 256.