



DINÁMICA, FACTORES CONDICIONANTES Y POSIBLES CAUSAS DE LA FORMACIÓN DE LA TARTERA DE CAMBRILS (SOLSONÈS, LLEIDA)

Dynamics, conditioning factors and possible causes of the formation of the Tartera de Cambrils (Solsonès, Lleida)

Mercè Casas^{1,2}, Marta Guinau¹, Anna Travé², Eduard Saura^{3,4}, David Garcia¹

¹ Grup de Recerca RISKNAT, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), c/ Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona.

mcasass1996@gmail.com, mguinau@ub.edu, dgarcia@ub.edu

² Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), c/ Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. atrave@ub.edu

³ Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès).

eduard.saura@uab.cat

⁴ Lithica SCCL, Av. Farners 16, 17430 Sta Coloma de Farners.

Abstract: Landslides and rockfalls are a common hazard in mountain areas like the Pyrenees. However, due to the difficulty of access and therefore of data acquisition, and the low density of population they are poorly studied. The Tartera de Cambrils, is located in a small town in the Solsonès region, Catalonia, and is the product of ancient landslides and succeeding rockfalls. These processes can endanger different infrastructures in the village of Cambrils such as the road, the sports centre, the salt flats called “El Salí” (currently also being used for tourist activity), two inns and several houses. This study aims to determine the processes that caused the initial landslides, those that occur at the rock slope nowadays and their causative factors. For this, we compiled information from the literature, conducted a field study building a geologic and geomorphologic cartography and acquired LiDAR data, with a Terrestrial Laser Scan, and photographs in order to produce three-dimensional point clouds. We also analyse the rock-cliff stability using photogrammetry and LiDAR data and direct measures of rock mass discontinuities. The bedding dips smoothly and contrary to the slope, making planar sliding an unprovable mechanism, favouring wedge sliding and toppling. The rock discontinuities are the main causative factor of rockfalls. Rockfall originates from rock fronts of decametric volume along the main scarp and on the scree. These rock fronts rotated respect to the rock in situ. The farther away from the main scarp, the larger the rotation of the blocks. The analysis of the fractures allows estimating an important possibility of rockfall directly affecting the inns and the road and provides fundamental data for the development of protection measures.

Keywords: Rockfall, rock mass discontinuities, LiDAR, photogrammetry.

Resumen: Los deslizamientos y desprendimientos son un peligro común en áreas montañosas como los Pirineos. Aun así, en ocasiones han sido poco estudiados por la dificultad de acceso y, por tanto, la dificultad en la adquisición de datos, y la baja densidad de población en estas zonas. La Tartera de Cambrils, en la comarca del Solsonès, Cataluña, es un canchal producto de antiguos deslizamientos y desprendimientos de roca que ponen en peligro infraestructuras del pueblo de Cambrils, con una concurrencia creciente debido al incremento de actividades turísticas en la zona. Este estudio quiere determinar los procesos que causaron los



deslizamientos iniciales, los procesos que ocurren en la ladera hoy en día y los factores que los causan. Para cumplir este objetivo, se ha consultado información bibliográfica y se ha llevado a cabo trabajo de campo para construir una cartografía geológica y geomorfológica, y se han adquirido datos LiDAR, con un Escáner Laser Terrestre, y fotografías del talud. Con los datos LiDAR y las fotografías se producen nubes de puntos tridimensionales, a partir de las que se estudian las discontinuidades y se analiza la estabilidad del talud. La continuidad, buzamiento y separación de la estratificación y la fracturación de la roca, dificultan el deslizamiento planar de bloques de roca y, por el contrario, facilitan el deslizamiento en cuña y el vuelco. El análisis de las discontinuidades permite estimar la posibilidad de futuros desprendimientos de roca sobre las distintas infraestructuras y proporciona datos fundamentales para planear futuras medidas de protección.

Palabras clave: Desprendimiento, discontinuidades del macizo rocoso, LiDAR, fotogrametría.

Casas, M., Guinau, M., Travé, A., Saura, E., Garcia, D., 2022. Dinámica, factores condicionantes y posibles causas de la formación de la Tartera de Cambrils (Solsonès, Lleida). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 35 (1): 3-14.

Introducción

Las inestabilidades del terreno suponen un peligro en zonas con elementos expuestos. En zonas de montaña como los Pirineos, donde deslizamientos y desprendimientos de bloques son inestabilidades frecuentes no se han realizado estudios exhaustivos de riesgos geológicos debido a la baja densidad demográfica de la zona. No obstante, el aumento de la actividad turística en estas zonas y, por tanto, de la exposición de más personas e infraestructuras, hacen necesario el estudio de estos fenómenos, muy controlados por las características de las discontinuidades en escarpes rocosos, para poder establecer medidas de prevención y de protección para mitigar el riesgo.

Concretamente, en la zona de Cambrils, donde se realiza este trabajo, existen pocos estudios, destacando el de Casanovas (2002), que realizó una estimación preliminar de la peligrosidad geológica en la zona de Odèn, y el de Montserrat (2018), que se centra en el estudio del canchal. Casanovas (2002) determinó una alta peligrosidad de desprendimientos en zonas de escarpes rocosos y de movilización de bloques acumulados en canchales, en las zonas denominadas: Tartera de Cambrils, Font dels Pins y Roca de Medes (Fig. 1). La orografía de la zona favorece que se puedan producir desprendimientos de roca, con volúmenes de escala métrica hasta decamétrica, controlados por las discontinuidades que afectan al macizo rocoso, y con graves consecuencias para los elementos expues-

tos. Montserrat (2018) divide el canchal en dos partes, una dominada por acumulación de bloques y otra colonizada por vegetación con una pendiente menos pronunciada, e indica que, esporádicamente, algunos bloques llegan a la carretera, especialmente en épocas de lluvias fuertes, y que aparecen grietas en infraestructuras cercanas. El trabajo de Montserrat (2018) también enumera los factores que controlan la estabilidad del terreno: la estratificación, la fracturación y la gelifracción, además, explica que el agua y la sismicidad actúan como factores desencadenantes.

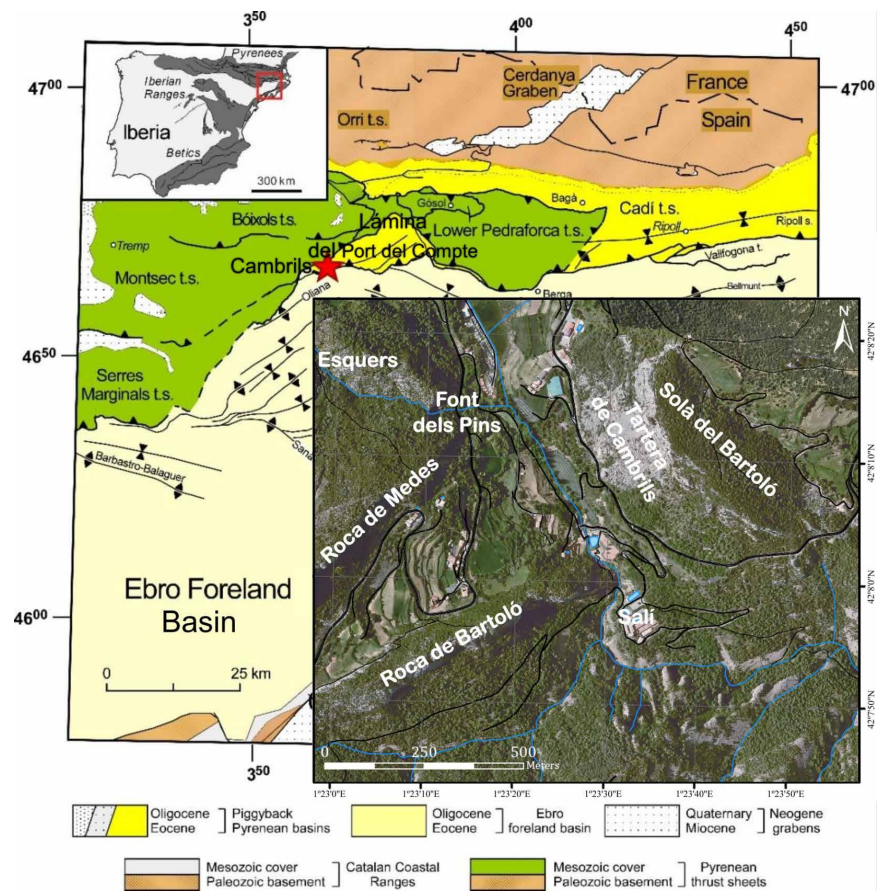


Fig. 1.- Localización geológica del área de estudio (estrella en rojo).

Cambrils está situado en el término municipal de Odèn, en el Solsonès, provincia de Lleida (Fig. 1). Es una población tradicionalmente agrícola en la que se encuentran las instalaciones de una antigua salinera denominada “El Salí”, que se usaba para extraer sal a partir del agua del manantial salado que mana en la zona, actualmente reconstruidas para el desarrollo de actividades turísticas. El estudio del canchal denominado Tartera de Cambrils es de relevancia ya que diversas infraestructuras, entre ellas “El Salí”, de cierta importancia histórica, además de los habitantes y turistas que visitan la zona, se encuentran expuestas a posibles desprendimientos y deslizamientos.

En las últimas dos décadas, ha habido un gran avance en la aplicación de técnicas de caracterización 3D para el estudio de laderas inestables, en general, y para el análisis de desprendimientos rocosos, en particular. Estos avances han aportado diversas metodologías de análisis para extraer automáticamente la información necesaria para los estudios de estabilidad, como, por ejemplo, la extracción y caracterización de discontinuidades del macizo rocoso, facilitando la adquisición de datos de forma remota. Las dos técnicas más usadas en la actualidad para tal fin son el láser escáner, también conocida como *Light Detection and Ranging* (LiDAR) (Petrie y Toth, 2008) y la fotogrametría digital, que utiliza la metodología *Structure from Motion* (SfM) para la obtención de modelos digitales 3D a partir de fotografías digitales (Riquelme *et al.*, 2017). Vanneschi *et al.* (2019), por ejemplo, estudian la estabilidad en una pendiente escarpada en el municipio de Fermignano (Italia), con características similares a la zona estudiada en este trabajo. En dicho trabajo se aplican herramientas para el estudio de desprendimientos, integrando métodos tradicionales en dos dimensiones, el escaneo con Laser Escáner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanning - TLS*) y fotogrametría digital, en este caso realizada con dron. El trabajo remarca, en particular, la importancia de una alta resolución y del uso de la fotogrametría para la reconstrucción correcta y completa de la pendiente, necesaria para el análisis y para el diseño de medidas de prevención y de protección. Asimismo, Battulwar *et al.* (2021) publican un estado del arte sobre la extracción automática de discontinuidades del macizo rocoso describiendo sus fortalezas e inconvenientes, llegando a la conclusión de que todas las metodologías analizadas requieren cierto tiempo de análisis y que todavía hay que desarrollar algoritmos eficientes para el cálculo directo del tamaño de bloque a partir de modelos 3D de las superficies rocosas.

La ladera donde se encuentra la Tartera de Cambrils presenta un terreno abrupto e inestable por lo que recopilar datos puede ser una tarea peligrosa. Para poder analizar el escarpe y el canchal sin peligro se han obtenido nubes de puntos tridimensionales a partir de datos obtenidos con LiDAR terrestre y fotografías de alta resolución, además de realizar un estudio convencional de la zona con la adquisición de datos directos. A partir de estos datos se ha realizado un análisis de la fracturación del macizo rocoso y un análisis cinemático para caracterizar los desprendimientos que actualmente están afectando infraestructuras expuestas como viviendas, dos pensiones, un polideportivo

y la carretera L-401 que cruza la población de Cambrils.

Este trabajo tiene como objetivo principal el estudio de los procesos que originaron la Tartera de Cambrils y los procesos actuales de inestabilidad, dominados por desprendimientos de bloques, así como los factores condicionantes para su formación. Para determinar las zonas más activas del canchal, este trabajo analiza el origen de los desprendimientos a partir del análisis de las discontinuidades del talud rocoso y un análisis cinemático para identificar las zonas con un mayor grado de inestabilidad.

Situación geológica

Geología local

Cambrils se sitúa en el margen sudoeste de la lámina cabalgante de Port del Compte (Fig. 1), entre los primeros relieves del Pirineo (Port del Compte, sierras de Odèn y Campelles, tozal de Cambrils, etc.). Justo al sur se encuentra el margen norte de la cuenca de antepaís (Cuenca del Ebro), rellena durante el Eoceno de materiales detríticos procedentes de los relieves del Pirineo. Al sudoeste de Cambrils destaca el anticlinal de Oliana (Fig. 1).

En la zona estudiada, los materiales abarcan del Triásico Superior al Holoceno (ICGC, 2016). Las unidades más modernas no están consolidadas, y forman canchales y terrazas fluviales. Entre el Holoceno y el Pleistoceno Superior se formaron travertinos bioconstruidos. Entre los materiales Eocenos, encontramos areniscas, conglomerados polimícticos y brechas del Oligoceno. La serie Eocena culmina con un tramo de conglomerados masivos. Casanovas (2002) indica que en la población de Canalda, al este de Cambrils, se pueden observar cómo, encima de los estratos más antiguos de buzamiento subvertical, los estratos Eocenos más modernos se vuelven más horizontales. Los materiales del Paleoceno y del Cretácico Superior, entre ellos facies Garumniense, se encuentran rodeando el núcleo urbano. Estos materiales forman parte de los primeros relieves de los Pirineos y son los más afectados por la estructura compleja de la zona. Los diferentes materiales carbonáticos intercalados con lutitas y areniscas se ven deformados por pliegues, fallas normales y cabalgamientos. Mata-Perelló (2001) confirma que los cabalgamientos utilizan las facies Keuper del Triásico Superior, observables en Cambrils, por la incisión del río Fred, como nivel de despeque.

Geomorfología local

El relieve de la zona está dominado por crestas rocosas formadas por las unidades de materiales resistentes a la erosión, como calizas y conglomerados, formando los relieves denominados Roca de Medes, Roca de Bartoló y Solà del Bartoló. Al pie de los escarpes rocosos que coronan estas crestas, se encuentran abundantes canchales que cubren parte de las laderas de la zona de estudio. La red hídrica transcurre de noroeste a sudeste, incidiendo en los materiales del Keuper. Sus depósitos forman pendientes muy suaves, usualmente ocupadas por banales de cultivo o pasto.

En la ladera sudoeste del relieve denominado Solà del Bartoló se encuentra el canchal objeto de este estudio, la Tartera de Cambrils, al este del núcleo urbano de Cambrils. Esta colina está coronada por un escarpe de longitud hectométrica y altura decamétrica muy afectado por fracturación y con una estratificación muy visible. Las características de este escarpe favorecen la formación de desprendimientos (*rockfalls* según Hungr *et al.*, 2014), la tipología de inestabilidades de ladera más frecuente en la zona.

Montserrat (2018) también describe un deslizamiento rotacional en el norte del canchal, pudiéndose observar la morfología usual de planos en la parte alta de la colina y ondulaciones al pie. El canchal está formado por un gran número de bloques de tamaños hasta decamétricos que se han desprendido del escarpe, los bloques de mayor tamaño se encuentran en zonas con vegetación frondosa o en las zonas superiores del canchal, éstos, al igual que el escarpe, pueden ser origen de desprendimientos. La zona central del canchal se puede dividir en diversas áreas con bloques de tamaño hasta métrico o de métrico a decamétrico, dependiendo de su tamaño de salida y de la fragmentación durante su trayectoria.

Metodología

Antes de empezar el trabajo de campo se realizó un estudio previo interpretando ortofotografías (ICGC, 2018) de la zona y consultando la cartografía geológica previa realizada por el ICGC (2016), mapa comarcal a escala 1:50.000. Dado que la precisión del mapa geológico del ICGC era insuficiente para el estudio planteado, sobre todo en cuanto a los límites entre unidades geológicas, se realizó un estudio en un área de unos 7 km² alrededor del núcleo urbano de Cambrils, elaborando una cartografía geológica más detallada. Durante el trabajo de campo se utilizó la aplicación *FieldMove Clino* (Petroleum Experts y Limited, 2021) para recopilar los datos que han servido para la elaboración de un corte geológico. También se ha elaborado

una cartografía geomorfológica de la zona con el objetivo de situar y describir con más detalle zonas de inestabilidad. Para obtener unos resultados más precisos, los datos de campo se han contrastado con imágenes de *Google Earth* y ortofotografías. Ambas cartografías se elaboraron con el programa *ArcGIS* versión 10.7.1 (Esri, 2019).

En este trabajo se estudia con más detalle el canchal denominado Tartera de Cambrils. El trabajo de campo realizado sobre la ladera del Solà del Bartoló, donde se encuentra el canchal, presenta varias complicaciones debido a la peligrosidad inherente en zonas con inestabilidad, y otros aspectos, como la presencia de vegetación y la fuerte pendiente que dificultan la accesibilidad a la zona de estudio. En las áreas sin peligro se han podido obtener datos precisos con medidas directas, en cambio, para obtener datos en las áreas inaccesibles, se han utilizado técnicas como el LiDAR terrestre, que permite la recopilación de datos 3D de una superficie con detección láser a distancia (Petrie y Toth, 2008), o la fotogrametría, que permite obtener datos 3D a partir de fotografías digitales. Ambas técnicas permiten alcanzar precisiones centimétricas dependiendo de factores como el tiempo invertido para obtener los datos, el número de estaciones desde las que se toman y el alcance de la herramienta usada, entre otros.

Los datos obtenidos con LiDAR ofrecen la oportunidad de analizar el objeto de estudio a distancia (sin necesidad de medidas directas), con lo que se pueden detectar planos difíciles de localizar a simple vista. Aun así, es importante complementar la información con los datos extraídos de los modelos fotogramétricos, ya que los datos LiDAR permiten detectar superficies continuas de las discontinuidades, mientras que los modelos fotogramétricos permiten interpretar las lineaciones de intersección de las discontinuidades con la superficie rocosa.

Los datos LiDAR se obtuvieron utilizando un escáner láser terrestre ILRIS 3D de *Teledyne Optech*, y para la fotogrametría se realizaron 83 fotografías digitales de alta resolución de la Tartera de Cambrils con una cámara digital

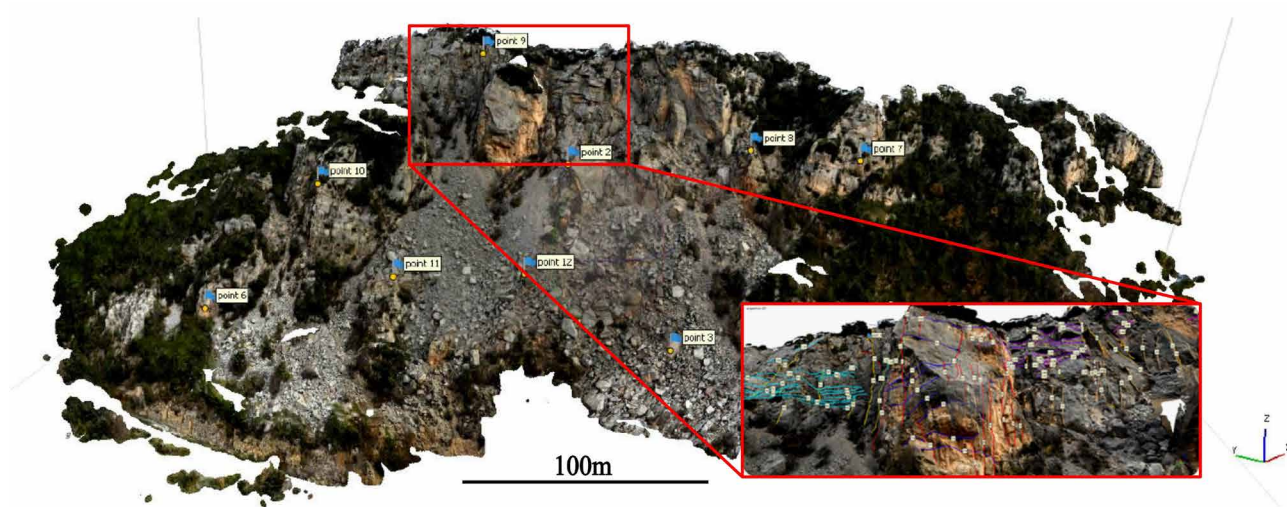


Fig. 2.- Modelo fotogramétrico visualizado mediante el programa *Agisoft Metashape*, con los puntos de control utilizados para escalar el modelo, a partir de los datos LiDAR. Ampliación de un sector del escarpe principal con la interpretación de las lineaciones correspondientes a la estratificación y a fracturación.

NIKON D850. La nube de puntos LiDAR se trató con el programa *SEFL (Surface Extraction from LiDAR)*, con el que se puede obtener la orientación de la superficie sobre la que se encuentra cada punto, a partir de una regresión planar teniendo en cuenta los puntos vecinos (García-Selles *et al.*, 2011). Visualizando la nube de puntos resultante con el programa *Cloud Compare* (Shapecast Limited, 2020), se pueden establecer agrupaciones de puntos que por su orientación y disposición forman superficies de una misma familia de discontinuidades. Este proceso permitió reconocer la estratificación y cuatro familias de fracturas.

A partir de las fotografías digitales se obtuvo un modelo fotogramétrico mediante el programa *Agisoft Metashape* (Agisoft LLC, 2021) (Fig. 2). El programa identifica puntos en común entre las fotografías, tomadas desde diferentes localizaciones, para reconstruir el objeto tridimensional. Sobre el modelo fotogramétrico el canchal se dividió en 16 sectores de roca con orientaciones distintas para facilitar su estudio mediante el mismo programa *Agisoft Metashape* (Agisoft LLC, 2021) (Fig. 3). La vertiente de la Tartera de Cambrils se dividió en 3 sectores en el escarpe principal, considerados *in situ* (con poco desplazamiento), y 13 sectores en el canchal, correspondientes a bloques rocosos decamétricos que han sufrido un desplazamiento desde la cabecera de la vertiente y que pueden dar lugar a desprendimientos de bloques más pequeños. Se recorrieron las discontinuidades visibles en el modelo fotogramétrico (Fig. 2), obteniendo una cartografía de lineaciones tridimensionales. Estas lineaciones fueron analizadas posteriormente con una macro de *Microstation* (Bentley Systems, Incorporated, 2017) que permitió obtener las orientaciones de las discontinuidades.

Los datos de orientación y buzamiento se compararon y contrastaron con los datos de campo mediante su proyección estereográfica con el programa *Dips de Rocscience* (Rocscience Inc., 2021). Una vez determinadas las diferentes familias de discontinuidades, se realizó una comparación entre los diferentes sectores definidos en la ladera para determinar la rotación de éstos desde la cabecera. A partir

de la inspección visual de los modelos fotogramétricos y los datos LiDAR se estimó un promedio del espaciado de cada una de las familias de discontinuidades para determinar el volumen de salida de los desprendimientos para cada sector.

Con el análisis cinemático de estos datos, se ha determinado el grado de peligrosidad relativo por desprendimientos y se ha estudiado la estabilidad, teniendo en cuenta los mecanismos de deslizamiento en cuña (*Wedge Sliding*) y vuelco (*Toppling*) (Hungry *et al.*, 2014). El deslizamiento planar no se ha contemplado debido a que la orientación del escarpe rocoso y la orientación de las discontinuidades que lo afectan son desfavorables a este mecanismo. Para realizar el análisis, la herramienta *Dips de Rocscience* (Rocscience Inc., 2021) usa los datos de orientación de las discontinuidades identificadas, el ángulo de fricción (en este caso de 20°, debido a la arcilla que se encuentra dentro de ellas) y la orientación de la superficie de cada sector, para determinar los posibles bloques que se pueden desprender en cada uno de los sectores. A partir de los resultados obtenidos, se sumaron los porcentajes de intersecciones críticas de cada tipología de desprendimiento y, con estos datos, se realizó una zonificación del grado de estabilidad de los diferentes sectores analizados. Posteriormente, se tuvo en cuenta el espaciado entre discontinuidades en cada sector para determinar un grado de peligrosidad, y finalmente, se localizaron las infraestructuras que podrían ser afectadas por desprendimientos originados a partir de cada una de las zonas de salida identificadas.

Resultados

Cartografía geológica

El estudio de campo ha permitido realizar una cartografía geológica (Fig. 4) de mayor precisión que la cartografía geológica 1:50.000 del ICGC (2016). También se han reclassificado, dentro de las facies Garumniense del Cretácico Superior, unos materiales originalmente cartografiados

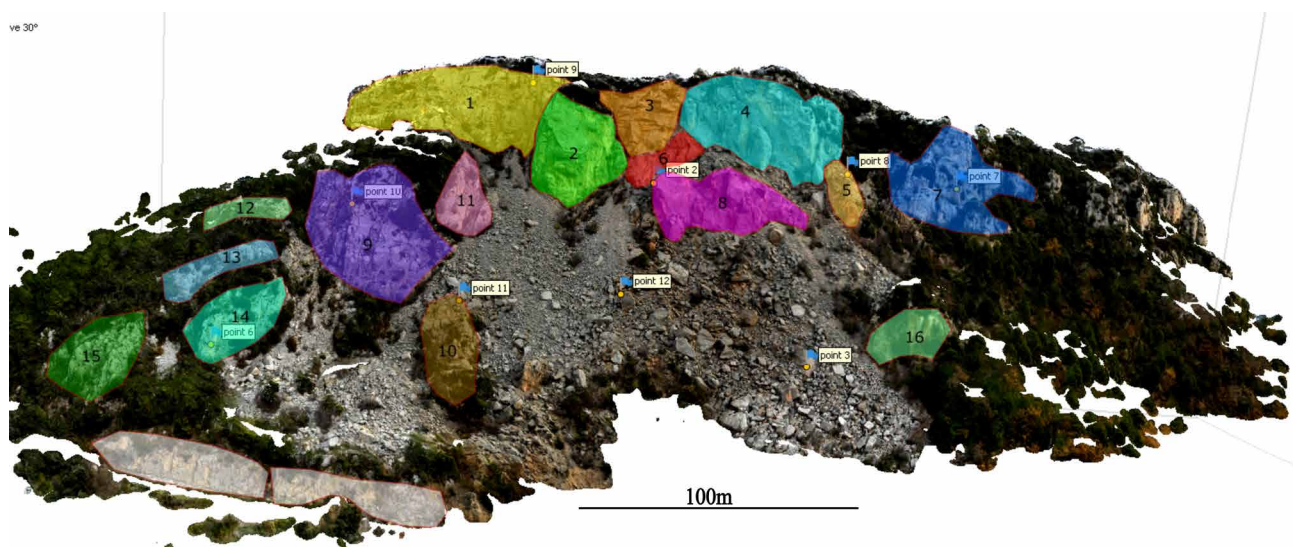


Fig. 3.- Sectores definidos para estudiar la posibilidad de ocurrencia de desprendimientos en la Tartera de Cambrils.

como Cuaternarios; los denominados “CG2” situados al oeste del núcleo urbano y en el monte donde se encuentra la Tartera de Cambrils (Fig. 4). Debajo de éstos, se ha encontrado una unidad de muy poca potencia, apenas una decena de metros cuadrados, formada por microconglomerados cuarcíticos que es parte de la formación Adraén (Cretácico Superior). También se ha localizado un afloramiento de travertinos Cuaternarios al este del canchal sobre materiales Oligocenos, aunque por su tamaño, de algunos metros, no es representable a la escala de la cartografía. A partir de la cartografía geológica, se ha realizado un corte geológico que permite interpretar la estructura de la zona en profundidad (Fig. 4).

Cartografía geomorfológica

Como se ha expuesto previamente, las inestabilidades de ladera en la zona de Cambrils se dan en diferentes lugares, aunque la zona más visiblemente afectada y que supone un mayor riesgo es la Tartera de Cambrils. Estas inestabilidades se originan, principalmente, en los escarpes rocosos indicados en la cartografía geomorfológica (Fig. 5) como la Roca de Medes, la Roca de Bartoló, los Esquers y el Solà de Bartoló, donde se encuentra la Tartera de Cambrils. Así mismo, se indican en la cartografía geomorfológica las acumulaciones de bloques situadas a pie de los escarpes rocosos formando canchales, y también se encuentran bloques disgregados en las vertientes del río, en las zonas del Racó y la Font dels Pins.

En la cabecera del escarpe principal del Solà de Bartoló, se observan grietas de tracción (en rojo en la Fig. 5) con una apertura de entre 5 y 7 metros, indicando una alta inestabilidad del talud y la posibilidad de desprendimiento de grandes bloques, de volumen decamétrico, desde la parte alta de la ladera. Los escarpes rocosos presentes en la zona, muy afectados por fracturación del macizo rocoso, presentan indicios de una alta actividad por desprendimiento de nuevos bloques o removilización

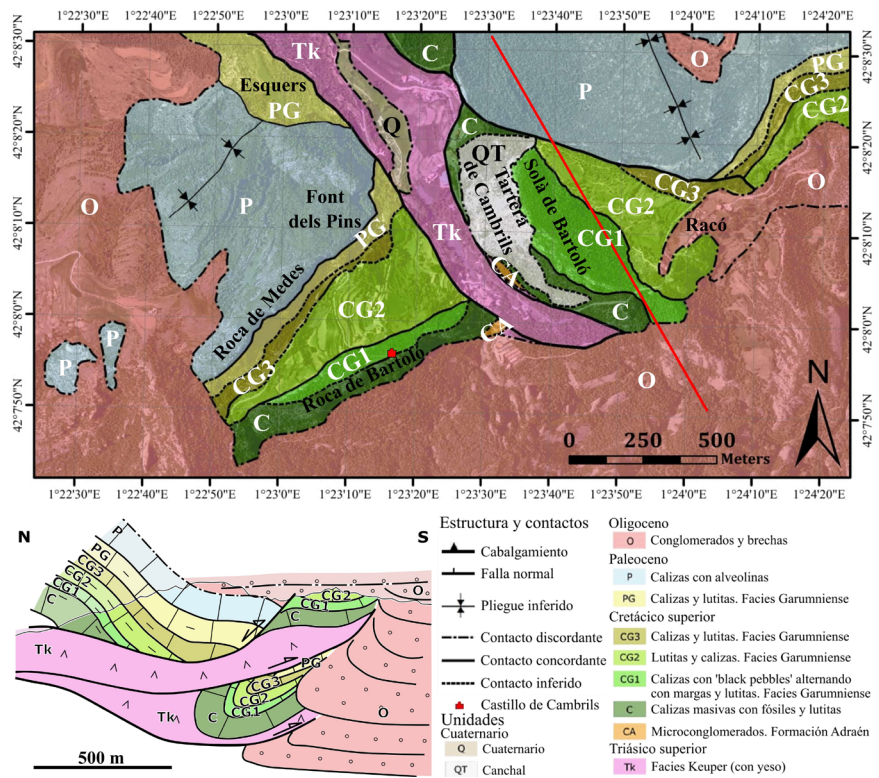


Fig. 4.- Cartografía geológica de la zona de estudio y corte geológico (trazado indicado con la línea roja). Sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM Zona 31N.

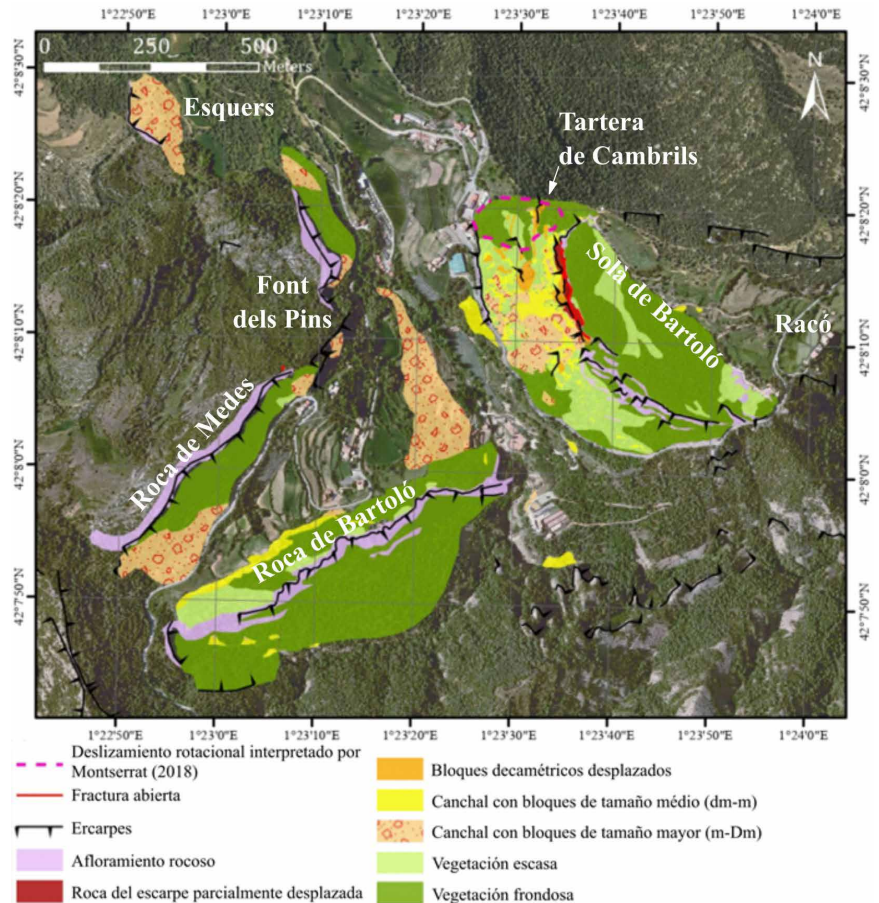


Fig. 5.- Cartografía geomorfológica. Se pueden ver las acumulaciones de bloques grandes y pequeños, así como las zonas cubiertas de vegetación. Sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM Zone 31N.

de los bloques acumulados en los canchales, con elementos expuestos configurando un escenario de riesgo elevado (Fig. 6). En particular, la Tartera de Cambrils se encuentra en una ladera cubierta por bloques caídos del escarpe de cabecera, formado por carbonatos cretácicos, o desde los bloques decamétricos desplazados, los cuales se encuentran, entre bloques de menor medida, formando un canchal encima de materiales más blandos de la misma unidad. La apertura de grietas subparalelas al escarpe, y la presencia de materiales blandos en la base, favorecen el cabeceo o vuelco de la parte frontal de éste, dando un buzamiento de la estratificación más suave que en el resto de la colina. Parte de esta ladera se encuentra cubierta por vegetación.

El canchal se ha dividido en dos zonas con vegetación abundante, una al norte y otra al sur, y una zona central con vegetación escasa (Fig. 5). En las tres zonas se encuentran bloques de roca de volumen decamétrico (16 visibles en total; 3 en el escarpe y 13 en el canchal), desplazados desde la cabecera, que pueden originar desprendimientos de bloques de menor tamaño (centimétricos a métricos). En la zona central el canchal está formado por bloques, los más visibles de tamaño métrico, que junto con la escasa vegetación hace más probable la removilización de éstos por impacto de los bloques desprendidos.



Fig. 6.- Bloque de aproximadamente 2 m³ desprendido en septiembre de 2020 que impactó en la fonda Casanova.

Procesos de formación inicial de la Tartera de Cambrils

La bibliografía consultada y las morfologías observadas en la ladera donde se encuentra el canchal estudiado en este trabajo, apuntan a la presencia de un deslizamiento rotacional en el extremo norte de éste, afectando las calizas del Cretácico Superior que se encuentran formando un escarpe rocoso en cabecera (Montserrat, 2018). Este deslizamiento, junto al deslizamiento y desprendimiento de bloques desde el escarpe principal, estarían causados por la presencia de materiales más blandos (lutitas), situados debajo de las calizas.

En la bibliografía no se han encontrado menciones de deslizamientos relevantes ocasionados por sismos o lluvias intensas en la zona de Cambrils. No obstante, se han reco-

pilado evidencias bibliográficas de terremotos que podrían haber afectado a la zona de estudio (Tabla 1) y que podrían haber actuado como desencadenantes de las inestabilidades observadas. Los resultados de la búsqueda no son concluyentes y no está claro si alguno de estos terremotos habría causado el deslizamiento inicial. Teniendo en cuenta la geología de la zona, se puede apuntar que, en un periodo de tiempo mayor, la tectónica salina en materiales del Keuper podría ser la causa de las inestabilidades de ladera o un agravante, al causar fracturación del macizo rocoso.

Año del sismo Autor	Origen según la bibliografía	Intensidad/ Daños causados
Marzo, 1373 Vilà (2019)	Montclús (Noguera)	VIII-IX MSK
2 de febrero, 1428 Duró (2016)	Camprodon	VIII MSK
1448 Duró (2016)	?	?
1755 Duró (2016)	La Seu d'Urgell* (coincidente con terremoto de Lisboa)	Objetos no ancorados se mueven
Varios durante 1788 Duró (2016)	La Seu d'Urgell y Arfa	III-VII MSK, derrumbe de una torre
22 y 23 de febrero, 1918 Chevalier (1918)	La Seu d'Urgell y Prats de Molló (Francia)	Sin mucha fuerza destructiva

*A 28 km de Cambrils

Tabla 1.- Terremotos históricos en los Pirineos.

Actividad actual de la Tartera de Cambrils

Se puede observar como la actividad reciente del canchal consiste en el desprendimiento de bloques del escarpe de cabecera o la removilización de los bloques desplazados que se encuentran a lo largo de la ladera. Hoy en día se documentan desprendimientos periódicamente, como el observado a principios de septiembre de 2020, cuando el efecto de un bloque de unos 2 m³, que impactó en una de las fondas al norte del canchal (Fig. 6), bloqueó una de las entradas, aunque, presumiblemente, la vegetación disminuyó la velocidad del bloque por lo que la infraestructura solamente sufrió daños menores.

Factores condicionantes y desencadenantes de la actividad actual en la Tartera de Cambrils

Los factores condicionantes de inestabilidades que se han observado en el canchal son: los diferentes materiales de la zona y su disposición unos respecto a otros (el área de salida de bloques está formada por calizas con alternancia de margas y lutitas); la orientación, el espaciado, la persistencia, la rugosidad y la apertura de las discontinuidades, la estratificación y la fracturación (éstas controlan el volumen de los bloques y la facilidad con la que se desprenden); la presencia de vegetación, que puede reducir el alcance de los bloques o, por otro lado, abrir las fracturas y favorecer los desprendimientos. A partir de las observaciones realizadas en el canchal y de la bibliografía sobre la zona, se apunta que los factores desencadenantes de las inestabilidades estu-

diadas podrían haber sido de origen climático, como lluvias intensas o heladas, o relacionados con actividad sísmica.

Análisis cinemático en la Tartera de Cambrils

En este trabajo se han estudiado el espaciado y la orientación de las discontinuidades, ya que, al controlar el tamaño de bloques desprendidos y la estabilidad del talud, se consideran los factores más relevantes por lo que concierne a la inestabilidad actual en el canchal. Se ha limitado el estudio de las discontinuidades a los sectores que presentan una mayor amenaza para los elementos expuestos, los sectores situados en el escarpe principal o cerca de él (1, 2, 3 y 4 en Fig. 3), y los más próximos a zonas de mayor exposición (9, 12, 13, 14 y 15 en Fig. 3).

En general, la estratificación es considerablemente menos variable en orientación que las fracturas. La estratificación medida en el Solà de Bartoló tiene una orientación (buzamiento/dirección de buzamiento) de entre 35°/070° y 50°/090°; esta orientación es contraria a la pendiente de la ladera, por lo que los procesos de deslizamiento planar no son los dominantes. Las diferencias de buzamiento obtenidas pueden ser debidas a la presencia de pliegues en la unidad y/o a la posible rotación de los bloques debida a la apertura de grietas de tracción en cabecera. A partir de la comparación con las orientaciones obtenidas en los bloques más alejados de la cabecera (Fig. 3) se ha establecido que la orientación de la estratificación difiere entre 2° y 25°, usualmente buzando hacia el noreste. En cuanto a la fracturación, extraída a partir de los datos LiDAR y fotogramétricos, se han identificado cuatro familias (Fig. 7). La comparación de la orientación de discontinuidades de la misma familia (Tabla 2 y Fig. 7) ha permitido establecer que los bloques decamétricos situados en la zona del escarpe y en cabecera, presentan una rotación menor que los bloques más alejados del escarpe principal. Las familias de fracturas identificadas, tienen orientaciones más variables (entre 4° y 35° en la familia de fracturas 1, 5° y 38° en la familia de fracturas 2, y entre unos 10° y 60° en las familias de fracturas 3 y 4). Las familias de fracturas 1 y 2 tienen un buzamiento aproximadamente vertical hacia el sur o el norte. Aunque éstas son las familias

que presentan mayor número de fracturas, hay sectores (3, 4, 12, 13 y 15) en que la nube de puntos LiDAR no permite visualizar la familia 1. Las familias de fracturas 3 y 4 constituyen buena parte de la superficie de los sectores analizados. Las familias 2, 3 y 4 tienen una dispersión mayor en sus orientaciones (Fig. 7) ya que forman un menor número de superficies, lo que dificulta la obtención de sus orientaciones con una población significativa de datos.

El espaciado entre discontinuidades de una misma familia es variable dependiendo del sector y, sobre todo, de la familia estudiada. En la mayoría de sectores se ha determinado que el espaciado entre discontinuidades es de orden métrico. La estratigrafía se mantiene con un espaciado de entre 1 y 2 m, la familia de fracturas 1 también tiende a un espaciado de entre 1 y, como mucho, 2,5 m, mientras que

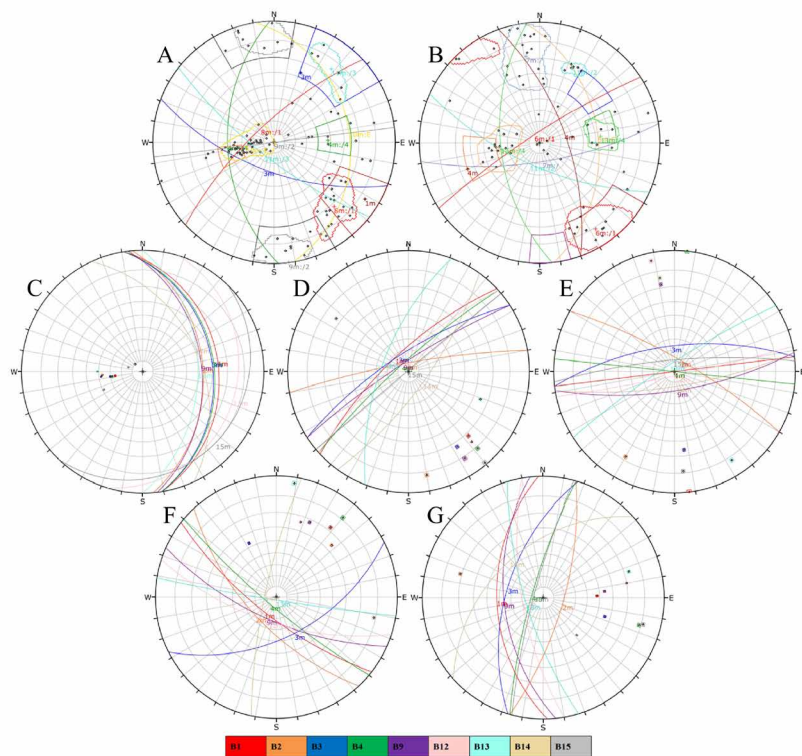


Fig. 7.- Estereografías realizadas con *Dips* de Rocscience a partir de los datos extraídos en los modelos del canchal. En naranja la estratigrafía, en rojo la Familia 1, en gris la Familia 2, en azul la Familia 3, en verde la Familia 4. A: Sector 1, B: Sector 9. C, D, E, F y G: Comparación gráfica de la orientación de la estratificación, F1, F2, F3 y F4, respectivamente, obtenidas con *Dips* de Rocscience.

E	B1	B3	B4	F1	B1	B3	B4	F2	B1	B3	B4	F3	B1	B3	B4	F4	B1	B3	B4
B1	-	-	-	B1	-	-	-	B1	-	-	-	B1	-	-	-	B1	-	-	-
B2	11	7	8	B2	34	25	33	B2	38	38	27	B2	11	63	18	B2	61	51	29
B3	4	-	-	B3	10	-	-	B3	24	-	-	B3	61	-	-	B3	16	-	-
B4	3	2	-	B4	9	13	-	B4	14	28	-	B4	8	65,5	-	B4	34	22	-
B9	12	8	10	B9	14	8	9	B9	18	42	22,5	B9	14	46	19,5	B9	8	19	31
B12	15	18	18	B12	4	8	4	B12	5	28	19	B12	20	40	26,5	B12	23	28	27
B13	16	12	14	B13	25,5	35	31	B13	27	30	40	B13	33	47	31	B13	28	36	32,5
B14	15	13,5	14	B14	35	39	27	B14	13	38	20	B14	62	66	60	B14	36,5	26	44
B15	21	25	24	B15	16	19	7	B15	11	13	15	B15	-	-	-	B15	35	24	1

Tabla 2.- Tablas de comparación de las orientaciones (en grados, °) de las discontinuidades entre sectores del canchal y sectores del escarpe, que se consideran próximas a las orientaciones en la roca ‘*in situ*’. Los datos de las celdas en gris se consideran insuficientes para obtener resultados del todo fiables. E: Estratigrafía, F: Familia de fracturas.

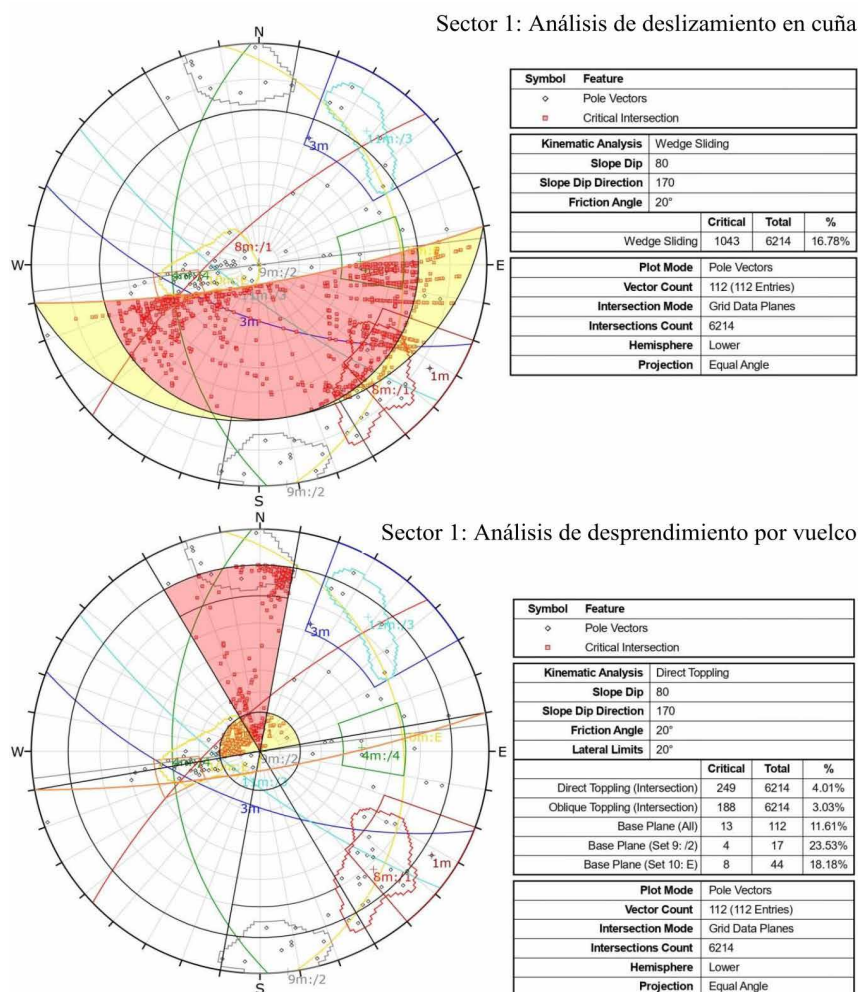


Fig. 8.- Identificación del número de discontinuidades o intersecciones que pueden generar un desprendimiento por deslizamiento en cuña o vuelco en el sector 1 del canchal.

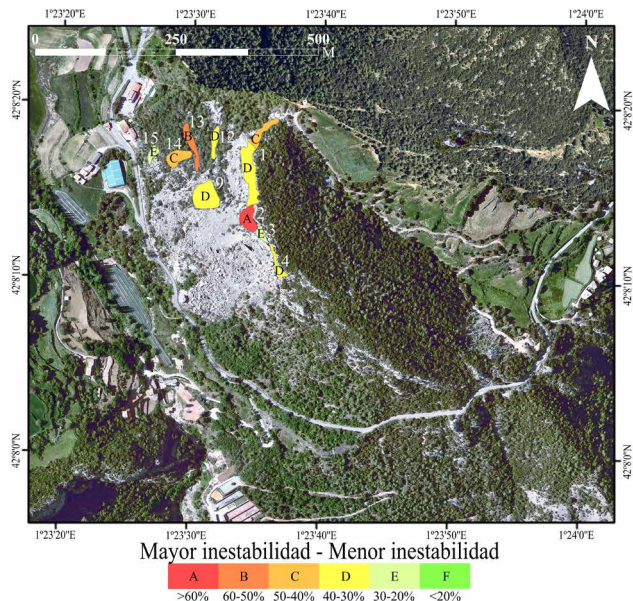


Fig. 9.- Zonificación del grado de estabilidad (A, más inestable, a F, más estable) estimado para cada uno de los sectores analizados en la Tartera de Cambrils a partir de la suma de porcentajes de intersecciones críticas obtenidas en el análisis cinemático. Sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM Zone 31N. La numeración en la imagen indica el número con el que se ha identificado cada sector.

en la familia de fracturas 2 suele ser muy variable, entre 1,2 y 5 m, en las familias de fracturas 3 y 4, el espaciado suele ser de alrededor de 2 m y en alguna ocasión puede superar los 5 m.

Tanto la orientación como el espaciado de las discontinuidades determinan como se producirán los desprendimientos. Teniendo en cuenta la disposición de las discontinuidades, y las orientaciones del talud en cada sector, los deslizamientos en cuña y vuelco son los mecanismos más probables (Fig. 8). La estimación de la estabilidad por cada mecanismo calculada con *Dips* de Rocscience (Rocscience Inc., 2021) permite realizar una zonificación de la estabilidad para cada sector de roca analizado. Los sectores con un mayor grado de inestabilidad, establecido con los resultados del análisis cinemático se sitúan encima de las fondas (mitad norte del sector 1, y los sectores 13 y 14) (Fig. 9). En el sector 2 el espaciado de las discontinuidades es mucho mayor que en el resto de sectores, por tanto, el grado de estabilidad de este sector es mayor a la estimada.

Debido a la orientación y al espaciado de las discontinuidades, y la cercanía a elementos expuestos, se determina que la mitad norte del sector 1 y los sectores 13 y 14 (Fig. 9) son los que presentan una mayor peligrosidad y los que podrían representar un mayor riesgo. Su proximidad a las fondas, y teniendo en cuenta el tamaño de bloques condicionado por el espaciado de las discontinuidades, podría comportar daños estructurales y un peligro para la vida e integridad física de las personas. Los otros sectores presentan un riesgo menor, aunque podrían afectar la carretera y sus usuarios, y otros edificios próximos.

Síntesis de resultados y recomendaciones para futuros estudios

La cartografía geológica de la zona (Fig. 4), en la que se han identificado unos límites más precisos entre unidades que los establecidos en la cartografía previa a escala 1:50.000 (ICGC, 2016), ha permitido reclasificar una unidad del Garumniense y localizar la formación Adraén. Además, junto con la elaboración del corte geológico realizado en la zona de estudio, se ha podido determinar la complejidad estructural de esta zona con una mayor precisión que la realizada hasta el momento (Mata-Perelló *et al.*, 2011). Este ajuste ha permitido identificar adecuadamente la disposición de los materiales que forman el escarpe del Solà del Bartoló

y los existentes debajo del canchal de la Tartera de Cambrils, mejorando la interpretación de los factores condicionantes de los deslizamientos en la zona. Esta cartografía, además, contribuirá a la realización de otros estudios geológicos en la zona. Con un estudio geológico aún más detallado se podría determinar cómo las inestabilidades de la zona están influenciadas por su estructura cosa que podría ser clave para deducir su comportamiento en el futuro.

La cartografía geomorfológica (Fig. 5) sitúa zonas posiblemente inestables: los escarpes rocosos de la zona de Cambrils y las acumulaciones de bloques a sus pies. Esta cartografía es relevante por los indicios de actividad elevada de desprendimientos en estas áreas, sobretodo donde la cubierta vegetal hace difícil detectar esa actividad. También es relevante situar las zonas de acumulación de bloques sin vegetación o con vegetación escasa, ya que no hay tantos obstáculos para la removilización de los bloques. En comparación con Casanovas (2002), el cual se limita a señalar zonas de peligro de desprendimientos, la cartografía geomorfológica de este trabajo indica zonas de salida de bloques y zonas de acumulación, y se indican zonas con bloques de mayor y menor tamaño. Montserrat (2018) describe un deslizamiento rotacional en el norte del canchal (Fig. 5) que no se ha analizado detalladamente en este trabajo, puesto que se ha priorizado el análisis más detallado de la actividad por desprendimientos rocosos, la cual supone un mayor riesgo en la zona. Este trabajo se centra en el análisis de los desprendimientos rocosos en la Tartera de Cambrils, aun así, hay otras localizaciones que presentan indicios de gran inestabilidad como la Roca de Medes y la Font dels Pins, donde se deberían realizar estudios similares para determinar la posible afectación sobre la carretera y otras infraestructuras cercanas.

El origen del proceso o procesos que dieron lugar a la formación de la Tartera de Cambrils es incierto y solo se han podido listar una serie de terremotos (Tabla 1) que podrían haber influido en la activación de los procesos de inestabilidad que dieron origen a su formación. No obstante, con la bibliografía consultada hasta el momento, no se ha podido vincular claramente ninguno de estos sismos con los deslizamientos y desprendimientos ocurridos en la zona.

La tipología de inestabilidades de ladera más activa actualmente, son los desprendimientos de bloques del escarpe principal y de los frentes rocosos situados a lo largo de la ladera o la posible removilización de los bloques situados en la ladera. Aunque la distribución de los materiales en la ladera (un nivel de calizas sobre materiales arcillosos) podría favorecer la reactivación del deslizamiento rotacional situado al norte del canchal, en períodos de lluvias prolongadas. El nivel de calizas superior se encuentra muy fracturado y con indicios claros de erosión kárstica que favorecen la infiltración de agua. Otro proceso a considerar en futuros estudios es el desprendimiento de los bloques decimétricos que se encuentran delimitados por las grietas de tracción abiertas en cabecera. Según las observaciones de campo y los indicadores recogidos en los mapas geológico y geomorfológico, estos bloques podrían sufrir desplazamiento y/o vuelco desde la cabecera. Sería conveniente realizar tareas de monitoreo, sobre todo para fenómenos de

mayor magnitud y, por tanto, de mayor peligrosidad, para detectar posibles períodos de activación del movimiento, estos permitirían desarrollar un sistema de alerta para evacuar o restringir la exposición en la zona si fuese necesario. No obstante, se deberían analizar con mayor detalle estas posibilidades puesto que el presente estudio se ha centrado en el análisis de los desprendimientos.

Las discontinuidades presentes en los frentes de roca son el factor condicionante principal de los desprendimientos. Sin embargo, la inaccesibilidad del macizo rocoso y el canchal, han dificultado la obtención de medidas directas para analizar estas discontinuidades, habiéndose obtenido los datos únicamente con sensores remotos (LiDAR y fotogrametría). Con las nubes de puntos tridimensionales obtenidas se han interpretado cuatro familias de discontinuidades y sus orientaciones medias. Aun así, en algunos de los sectores analizados, la localización de los puntos desde los que se han tomado los datos con el Escáner Laser Terrestre y las Fotografías Digitales Terrestres, ha limitado la obtención de datos de algunas familias y hacen difícil la caracterización de éstas con total certidumbre. Vanneschi *et al.* (2019) evitan este problema en su trabajo realizando un vuelo fotogramétrico con dron, que les ha permitido obtener un modelo más completo e interpretar mejor algunas discontinuidades, que quedarían mal representadas si solamente se utilizara la fotogrametría terrestre debido a la restricción del ángulo de visualización de algunos sectores. Por tanto, sería conveniente realizar la obtención de datos LiDAR de la zona con el mismo método, para obtener nubes de puntos que puedan cubrir diferentes perspectivas de la ladera.

En este trabajo se determina un orden de magnitud del espaciado de cada familia de discontinuidades en cada sector, el cual controla el tamaño de bloques desprendidos, que, conjuntamente con el análisis cinemático, permite establecer un grado de peligrosidad para cada sector. No obstante, para mejorar el análisis de la peligrosidad, se debería realizar un análisis más detallado teniendo en cuenta el posible volumen de los bloques (desde tamaños centimétricos a decamétricos), a partir del espaciado y continuidad de las fracturas o del tamaño de los bloques situados en el canchal. Dada la dificultad de obtener medidas directas sobre los frentes de roca, se podrían realizar *scanlines* o ventanas de muestreo sobre los modelos fotogramétricos y los datos LiDAR, para determinar con mayor precisión el espaciado y la continuidad de las discontinuidades, mejorando así el cálculo del volumen de bloques y el análisis de la peligrosidad de cada sector. Además, para determinar que estructuras se pueden ver expuestas a la trayectoria de posibles desprendimientos, convendría realizar simulaciones de las posibles trayectorias de los bloques a partir de las zonas de salida identificadas y zonificar el alcance y las energías de impacto, datos que serían relevantes para el establecimiento de medidas de protección.

Conclusiones

La cartografía geológica mejorada respecto a la existente y el nuevo corte geológico realizado en la zona de estudio, han permitido conocer mejor los materiales existentes y su

estructura, permitiendo mejorar la descripción de los posibles condicionantes geológicos de los procesos de inestabilidad de laderas presentes en la zona. De esta forma, se ha podido constatar que la presencia de materiales evaporíticos triásicos condiciona fuertemente la estabilidad de los niveles carbonáticos del Cretácico Superior y del garumniense. Además, la cartografía geomorfológica realizada ha permitido definir las zonas de posible desprendimiento y acumulación de bloques que pueden comportar un riesgo, el cual se ha considerado evidente en la Tartera de Cambrils.

El estudio realizado ha permitido determinar que la Tartera de Cambrils, inicialmente formada por deslizamientos y desprendimientos de bloques rocosos, continúa activa actualmente. El proceso más activo son los desprendimientos, fuertemente condicionados por la fracturación de los frentes rocosos presentes en la ladera del Solà de Bartoló. Esta fracturación ha sido analizada digitalmente mediante datos LiDAR y fotogramétricos, que han permitido identificar cuatro familias de fracturas con una orientación y un espaciado más variables que la estratificación. Los mecanismos más habituales de inestabilidad en el canchal son, de acuerdo con la orientación de las discontinuidades y sus intersecciones, los desprendimientos iniciados como deslizamientos en cuña y los vuelcos de bloques de tamaño métrico, principalmente. Los sectores de roca decamétricos desplazados desde el escarpe presentan una posibilidad de activación importante, al igual que el escarpe, que presenta grietas de tracción subparalelas al talud con apertura métrica que puede dar lugar al vuelco de bloques decamétricos. Los resultados del presente estudio indican que los sectores 13 y 14, situados al norte del canchal, son los que presentan una peligrosidad mayor por desprendimientos de bloques métricos y, por tanto, son los que podrían representar un mayor riesgo debido a las infraestructuras (fondas, centro deportivo e instalaciones turísticas) expuestas en la zona de trayectoria.

Agradecimientos y financiación

Las autoras y autores de este trabajo quieren agradecer a dos personas revisoras anónimas sus comentarios y sugerencias que han contribuido a mejorar la versión final del manuscrito, también agradecen las contribuciones de la editora de la revista durante el proceso de revisión. Este trabajo forma parte de proyecto “Unravelling fluid flow during the evolution of inverted basins and orogenic belts: application to CO₂ storage” (DGICYT Spanish Project PGC2018-093903-B-C22). Grupos Consolidados de Investigación “Geología Sedimentaria” (2017SGR-824) y “RISKINAT” (2017SGR-126).

Contribución de autores/as

Elaboración del trabajo, M.C., A.T. y M.G.; metodología, M.C.; obtención de datos, M.C., A.T. y M.G.; figuras, M.C., A.T. y E.S.; investigación/análisis, M.C., D.G. y M.G.; revisión del manuscrito, A.T. y M.G.; coordinación, A.T. y M.G.; supervisión, A.T. y M.G.; obtención de financiación, A.T. y M.G.

Referencias

- Agisoft LLC, 2021. Agisoft Metashape (Version 1.7.2) [Software] Disponible en <https://www.agisoft.com/> (12/04/2022).
- Battulwar, R., Zare-Naghadehia, M., Emamib, E., Sattarvanda, J., 2021. A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13: 920-936. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>
- Bentley Systems, Incorporated (2017) MicroStation (V10) [Software] Disponible en <https://virtuosity.bentley.com/> (12/04/2022).
- Casanovas, J., 2002. Dictamen preliminar d'identificació de perillositat geològica als sectors de desenvolupament urbà del municipi d'Odèn (Solsonès). Normes de planejament urbanístic. Municipis de la Catalunya Central. Generalitat de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya. ICC/AR-156-02. <http://ptop.gencat.cat/rpuportal/AppJava/cercaExpedient.do?reqCode=saveAsDocument&documentId=268692> (12/04/2022).
- Chevalier, M., 1918. Nota sobre el temblor de terra ocorrida en la Seo de Urgel el 22 de febrer de 1918. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*. Tercera Época, vol. XIV, núm. 6.
- Duró, U., 2016. Els terratrèmols de 1788 i la devoció a sant Emigdi a la Seu d'Urgell. INTERPONTES IV
- Esri, 2019. ArcGIS (Versión 10.7.1) [Software] Disponible en <https://www.esri.com/en-us/home> (12/04/2022).
- García-Selles, D., Falivene, O., Arbués, P., Gratacos, O., Tavani, S., Muñoz, J.A., 2011. *Computers & Geosciences*, 37: 1584-1594. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.007>
- Hung, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an Update. *Landslides*, 11: 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- ICGC., 2016. Mapa geològic comarcal de Catalunya 1:50.000 (Alt Urgell). Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Barcelona.
- ICGC., 2018. Ortofoto convencional resolució 25cm/segon. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Barcelona.
- Mata-Perelló, JM., 2001. Las salinas continentales en los Pirineos occidentales. *Museu de Geologia de la UPC*. 1er. Simposio Interfronterizo sobre el Medio Natural Pirenaico. Sort, C12: 121-126.
- Montserrat, A., 2018. Les tarteres de Cambrils, a l'Alt Solsonès. Una aproximació a la seva gènesi i evolució. *Muntanya*: 54-61.
- Petrie, G., Toth, C., 2008. *Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning*. CRC Press, 28 p. <https://doi.org/10.1201/9781420051438.ch1>
- Petroleum Experts, Limited, 2021. FieldMove Clino (Version 2.5.19) [Software] Disponible en <https://www.petex.com/products/move-suite/digital-field-mapping/> (12/04/2022).
- Riquelme, A., García-Davadillo, J.C., Sarro, R., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L., Abellán, A., Herrera, G., 2017. Caracterización geomecánica del talud desprendido en Cortes de Pallàs (Valencia) mediante Structure from Motion (SfM) con imágenes adquiridas con Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann, Eds.). CIMNE, Barcelona. *Comunicaciones*: 545-556.
- Rocscience Inc., 2021. Dips de Rocscience (Version 8.017) [Software] Disponible en <https://www.rocscience.com/> (12/04/2022).
- Shapecast Limited, 2020. CloudCompare (Version 2.11.2)

[Software] Disponible en <https://www.danielgm.net/cc/> (12/04/2022).

Vanneschi, C., Di Camillo, M., Aiello, E., Bonciani, F., Salvini, R., 2019. SfM-MVS Photogrammetry for Rockfall Analysis and Hazard Assessment Along the Ancient Roman Via Flaminia Road at the Furlo Gorge (Italy). ISPRS International Journal of Geo-Information, 8: 325. <https://doi.org/10.3390/ijgi8080325>

Vilà, J., 2019. 3 de març de 1373: La desaparició de Montclús.

DIVULCAT | Divulgació científica en català <https://www.encyclopedia.cat/divulcat/3-de-marc-de-1373-la-desaparicio-de-montclus> (05/06/2021).

Battulwar, R., Zare-Naghadehia, M., Emamib, E., Sattarvanda, J., 2021. A state-of-the-art review of automated extraction

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 04-10-2021

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 22-04-2022

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 01-05-2022