EL USO COMBINADO DE TÉCNICAS TOPOMÉTRICAS, FOTOGRAMÉTRICAS, TELEDETECCIÓN Y DE CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA EL SEGUIMIENTO DE TALUDES ESTABILIZADOS TRAS UN EVENTO PAROXÍSTICO; EL EJEMPLO DE RUENTE.

ALBERTO GONZÁLEZ DÍEZ ⁽¹⁾, JOSÉ ANTONIO BARREDA ARGÜESO ⁽¹⁾, MANUEL DOMINGO DEL JESÚS CLEMENTE ⁽²⁾, MIGUEL ANGEL DIEZ BARRIO ⁽²⁾, ZURA RIKADZE ⁽¹⁾, IGNACIO GARCÍA UTILLA ⁽³⁾ y LAURA RODRIGUEZ RODRIGUEZ ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria. Avd. Los Castros s/n, 39005 Santander, Cantabria. gonzalea@unican.es (autor correspondiente)

⁽²⁾ Consejería de Obras Públicas, Ordenación del Territorio y Urbanismo, Gobierno de Cantabria. C/Alta 5, 7, 39008 Santander, Cantabria.

⁽³⁾ Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria. Avd. Los Castros s/n, 39005 Santander, Cantabria.

RESUMEN

En enero de 2019, Cantabria se vio afectada por un periodo prolongado de precipitaciones con registros de intensidad muy elevados. Multitud de laderas, así como algunas infraestructuras relevantes, como la CA-180, a su paso por Ruente, sufrieron daños por deslizamientos. Allí, un talud fue afectado simultáneamente por cinco deslizamientos que involucraron tanto a depósitos superficiales como al macizo rocoso; conllevando trabajos de restauración. Finalizados éstos, y con el fin de anticiparse ante posibles nuevas roturas se ejecutaron tareas de seguimiento-control mediante el empleo combinado de técnicas topométricas, fotogramétricas (imágenes capturadas por drones), teledetección, caracterización del macizo rocoso. Los registros constataron varios datos de interés: el papel jugado por los materiales alterados y anisotropías del macizo rocoso en su génesis; el papel jugado por el agua que saturó el talud; y la actuación de precipitaciones otoñales. Asimismo, constataron como el uso conjunto de estas técnicas refuerzan el estudio de taludes.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de taludes constituye una medida de mitigación ampliamente empleada en aquellas áreas susceptibles al desarrollo de procesos de movimientos en masa (Bromhead, 1997). Los métodos de estabilización comprenden un amplio campo de medidas, entre las que destacan por su frecuente aplicación: el cambio de la geometría de la ladera, del drenaje y el empleo de medidas de refuerzo y sostenimiento (Popescu y Sasahara, 2009; Kazmi et al., 2017; Winter et al., 2022). El seguimiento de los taludes restaurados tras eventos paroxísticos ha atraído el interés de la comunidad científica ante la necesidad de conocer la utilidad de las medias paliativas descritas. Tanto en la práctica profesional como en la literatura aparece un amplio espectro de medidas para la observación-seguimiento de

laderas estabilizadas (Brezzi et al., 2020). Para ello, se han usado muchas herramientas como inclinómetros, sensores de presión, galgas extensométricas, técnicas topométricas como GPS o topografía clásica, láser escáner terrestre (Kazmi et al., 2017), fotogrametría de objeto cercano, técnicas de análisis de imagen o fotogramétricas (como la estructura para el movimiento) que se favorece gracias al empleo de centenares de imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados o VANT (González-Díez A. et al., 2014; Riquelme et al., 2017). Recientemente, dentro de esa lista se han incorporado otras herramientas novedosas como son las técnicas termográficas (Racek et al., 2021) o fibra óptica ligada a anclajes (Abeykoon et al., 2018; Gallage et al., 2018). A pesar del amplio despliegue de trabajos existente en la literatura, en el que se muestra la bondad de estos métodos, todavía hay pocos ejemplos donde varias de dichas herramientas se presentan de manera complementaria. Y muchos menos en los que se estudia el comportamiento de taludes restaurados ante nuevos eventos de precipitación. En estos ejemplos de rápido desenlace es posible comprobar la eficiencia de las medidas y herramientas utilizadas, a corto plazo; sin la necesidad de abrir amplias ventanas de registro, de analizar sutiles variaciones de parámetros, o resultados de diferente precisión o resolución espacial. Y uno de esos ejemplos es el talud de Ruente (Cantabria), que sufrió una intensa alteración por deslizamientos (denominados argayos en Cantabria) desencadenados por precipitaciones ocurridas en invierno de 2019. Una vez fue restaurado se llevaron a cabo tareas de seguimiento y control ante posibles nuevas alteraciones producidas por otros eventos de lluvia. Para ello, se llevó a cabo un seguimiento del talud mediante el empleo combinado de técnicas topométricas (GPS diferencial), fotogramétricas-tratamiento de imagen (mediante imágenes capturadas por drones) y geomecánicas. En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos en el seguimiento del talud restaurado.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio correspondiente al talud restaurado se presenta en la Fig 1. La Carretera Autonómica (CA) -Cabezón de la Sal a Valle de Cabuérniga- sufrió una importante afección al paso por la localidad de Ruente (Cantabria), en el P.K. 7+400 (Fig 1a), como consecuencia de importantes precipitaciones. El talud se encuentra situado a 219 (m.s.n.m.), en la Cuenca hidrográfica del río Saja, justo después de cruzar la Sierra del Escudo de Cabuérniga en dirección sur. Desde un punto de vista climático (Fig 1b), se registran precipitaciones durante todo el año (precipitación median anual, p.m.a. es 1341 mm) y la temperatura es suave (temperatura media anual, t.m.a. es 12,2 °C), correspondiendo a una asociación climática Cfb según Köppen y Geiger (CLIMATE-DATA.ORG, 2022). El mes más lluvioso es noviembre (148 mm) mientras que en el estío se sitúa en agosto manteniendo precipitaciones significativas (89 mm). En ese mismo mes se registran las temperaturas máximas (18,3 °C) mientras que en febrero se registran las mínimas (6,8 °C).

Desde un punto de vista geológico, los materiales del substrato son mesozoicos (Fig 1c). Los más antiguos corresponden a calizas y margo calizas del Jurásico Medio de origen marino. Sobre éstos se encuentra una secuencia sedimentaria cíclica de carácter continental denominada Formación Bárcena Mayor, cuya edad se sitúa en el Cretácico Inferior. Por encima aparecen los materiales de la cobertera. Corresponden con sedimentos cuaternarios formados por depósitos fluviales y de ladera, que en la cumbre se encuentran recubiertos por rendzinas, cambisoles eutrícos-dístricos, y pequeñas isletas de rankers. Estructuralmente, dichos materiales se sitúan en el flanco norte de una gran estructura antiformal que discurre por la localidad de Terán y que afecta a todo el conjunto sedimentario mesozoico. Esta macro estructura se encuentra mecanizada por fracturas de dirección SE-NW que favorecen el desarrollo de los valles fluviales afluentes al río Saja.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el análisis de la evolución del talud consta de dos componentes. La primera está firmemente apoyada en otras aproximaciones metodológicas que ya han sido probadas con éxito en estudios equivalentes (González-Díez et al., 2017; González-Díez et al., 2018). En ellas, se combinan técnicas fotogramétricas, topométricas y de tratamiento de imagen con otras de carácter más hidrogeológico, geomorfológico y geomecánico.



Fig.1 Carboncillo del paisaje de Ruente en el que se muestran las siguientes características: a, localización del talud de Ruente dentro de Cantabria y de la cuenca del río Saja; b, climograma de Ruente; c, principales unidades estratigráficas que afloran en el talud.

La segunda, incorpora un análisis del macizo rocoso, a lo largo del tiempo en el que se realiza el estudio, con el fin de poder conocer cómo ha variado su comportamiento tras los diferentes eventos de precipitación que afectaron al talud. Posteriormente, mediante test cinemáticos (Markland, 1972) alimentados con datos extraídos de clasificaciones geomecánicas, se analizó la potencialidad de las anisotropías presentes para generar roturas.

De manera más amplia, el método parte de la confección de una base de datos que comprende tanto la recogida de datos climáticos, geológicos, topométricos, y de teledetección. En el caso de estudiado, los datos climáticos, se obtuvieron de la red de estaciones meteorológicas automáticas de la AEMET existentes en la zona. Las medidas topométricas han sido realizadas empleando la misma aproximación e instrumentación que en González-Díez et al. (2017, 2018). Los datos fotogramétricos han sido elaborados a partir de imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados (VANT) popularmente conocidos como drones. Principalmente, se empleó un modelo DJI Phantom 4 que incluía una cámara de 12,4 megapíxeles modelo FC330_3.6_4000x3000 calibrada. Las imágenes capturadas se procesaron posteriormente en el software Pix4D Mapper V.4.3.27 basado en algoritmos de estructura para movimiento (SFM). Los apoyos fotogramétricos se realizaron a partir de más de 50 puntos en el terreno, registrados mediante los dispositivos GPS bifrecuencia. La caracterización de las unidades geologías involucradas en el deslizamiento ha considerado tanto a los materiales del substrato, de cobertera como de la estructura geológica existente. Dichos datos aportan información de las características de la matriz rocosa y las anisotropías presentes en el macizo rocoso. Una vez identificadas y cartografiadas sobre el talud las unidades geológicas (empleando técnicas de campo y fotointerpretación) se ha procedido a su caracterización geomécanica siguiendo las propuestas metodológicas de González de Vallejo y Ferrer Gijón (2007). Varias agrupaciones fueron diferenciadas, fijándose estaciones en las que se midieron diversos parámetros geomecánicos y extrajeron muestras para ulteriores determinaciones en laboratorio. Los parámetros recopilados son: 1) Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa: ensayo de compresión simple (laboratorio), ensayos PLT (campo-laboratorio), medidas equivalentes por medio de esclerómetro (campo).

2) Grado de fracturación del macizo: determinación del parámetro Jv (campo), y posterior determinación del RQD aplicando la corrección empírica de Palstron (ISRM, 1981).

- 3) Espaciado de las discontinuidades: separación entre diaclasas (m).
- 4) Condiciones de las discontinuidades: rugosidad, continuidad, relleno, bordes.
- 5) Condiciones hidrogeológicas: caudal, presión de agua, humedad.

Con los datos descritos se elaboraron clasificaciones geomecánicas empleado el RMR de Bieniawski (1979). Mediante dichos parámetros, usando análisis cinemáticos alimentados con la geometría del talud y de las anisotropías del macizo rocoso se han identificado las diferentes cuñas que es posible puedan aparecer en el talud y, su potencial susceptibilidad para desarrollar naturalmente deslizamientos. Las puntuaciones iniciales RMR se compararon con las obtenidas en otras fechas del periodo de estudio, permitiendo analizar mediante los respectivos test cinemáticos los cambios del comportamiento geomecánico sufridos por las diferentes unidades identificadas. Paralelamente, se desarrolló un análisis geomorfológico que ha comprendido la caracterización de los procesos activos desarrollados con posterioridad al evento paroxístico. Para ello, se emplearon las tradicionales técnicas de campo y fotointerpretación. La fotointerpretación estuvo basada tanto en imágenes aéreas (PNOA, como otras capturadas por los VANT y cámaras instaladas sobre el terreno) como de satélite (Sentinel 2 y 3). Los contactos cartografiados fueron introducidos en una geodatabase que se gestionó en ARGIS. Estos datos estuvieron apoyados por medidas GPS sobre el terreno y fotogrametricas. El seguimiento de las deformaciones manifestadas en el talud se llevó a cabo cada tres semanas aproximadamente.

4. RESULTADOS

Los principales resultados del estudio de la evolución del talud restaurado se presentan a continuación organizados según los siguientes subapartados: talud reconstruido; análisis de las unidades litológicas presentes, características geomecánicas de las agrupaciones del terreno; análisis de la evolución de la precipitación como factor desencadenante; análisis geomorfológico y evolución del talud.

<u>Talud reconstruido.</u> Localizado en la CA 180 (pk. 7+400), a su paso por Ruente (Fig 1). La construcción del talud ha ocasionado la extracción de un volumen importante roca correspondiente a los materiales del substrato; aprovechando la estructura geológica, y siguiendo la estratificación (Fig 2). Los modelos digitales de superficie obtenidos muestran como el talud posee cuatro orientaciones dominantes: WSW, W, NW y N. Las dos primeras han generado recortes con inclinaciones de entre 52 y 60°; mientras que las dos últimas han conformado taludes con inclinaciones de entre 30 y 38°. El pie del talud ha sido reforzado mediante un muro cimentado con anclajes sobre el propio cauce del río Saja, que se ha revestido de otro de mampostería para impedir la acción erosiva del río. Adicionalmente se ha creado una plaza amplia, a la misma cota de la carretera, con trinchera y caballón de frenado, que de momento está impidiendo la llegada de bloques desprendidos.

<u>Análisis de las unidades geológicas presentes.</u> De las unidades estratigráficas descritas y presentadas en la Fig 1, la más afectada por la construcción del talud es la Formación Bárcena Mayor, constituyendo el substrato rocoso. Tiene una disposición estructural de dirección NW-SE y un buzamiento medio en dirección W, con un peso específico saturado promedio relativamente elevado (29,1 KN/m³). El desmonte realizado exhumo las unidades de cobertera excepto el coluvión. Se han identificado siete familias de anisotropías en el macizo rocoso, cuyas orientaciones promedio (dirección y buzamiento) son las siguientes: F1, 141°- 67°; F2, 47°- 85°; F3, 87°- 66°; F4, 312°- 64°; F5, 225°- 27°; F6, 0°- 90°; F7, 10°- 46°. Adicionalmente, se debe subrayar la presencia de una falla cuyo rumbo es F 297°, con un buzamiento de 60° y la estratificación promedio, S0, cuya dirección es 197° y buzamiento 49° todas ellas se han presentado en proyección estereográfica en la Fig 2.



Fig 2. Esquema 3D con la disposición estructural de las agrupaciones geomecánicas confeccionadas (números negrita, negro) y red de fracturación (proyección estereográfica situada a la izquierda). En blanco unidades litoestratigráficas. La correspondencia entre agrupaciones geomecánicas y unidades litoestratigráficas es la siguiente: 1, 2 y 3 (unidad 2.1 de areniscas amarillentas); 4, (unidad 2.3, niveles de lutitas negras); 5, (unidades 2.2b y 2.3, corresponden con las secuencias cíclicas de lutitas grises-verdosas); 6, (unidad 2.3, lutitas grises-negras con lignitos); 7 (unidad 2.2a, lutitas rojas con algún nivel de areniscas).

<u>Características geomecánicas de las agrupaciones del terreno</u>. La combinación entre las diferentes unidades de matriz rocosa, anisotropías y geometría del talud permitió definir las siguientes agrupaciones geomecánicas presentadas en la Fig 2, indicando entre paréntesis su correspondencia con las unidades lito-estratigráficas: 1 o meridional, 2 o central (está muy mecanizada) y 3 o septentrional (las tres corresponden con unidad 2.1 de areniscas amarillentas); 4, (unidad 2.3, niveles de lutitas negras); 5, (unidades 2.2b y 2.3, corresponden con las secuencias cíclicas de lutitas grises-verdosas); 6, (unidad 2.3, lutitas grises-negras con lignitos); 7 (unidad 2.2a, lutitas rojas con algún nivel de areniscas). Asimismo, se calificó como grupo 7 el cono de finos situado al pié del grupo 2 (principalmente arcillas rojas y algún bloque de lutitas rojas y areniscas), formado por restos desprendidos desde la cumbre del talud. Como queda patente en la Fig 2, el recorte del talud ha supuesto que la mayoría de las agrupaciones 6 y 7 hayan sido exhumadas de la cara central del talud, quedando tan solo situadas en su pie.

Tras la finalización de los trabajos de restauración, las primeras medidas efectuadas en las estaciones geomecánicas muestran los siguientes valores promedio para las unidades litoestratigráficas: Unidad 2.1, areniscas de grano medio, ferruginosas, de colores amarillo-beige, posee una clasificación geomecánica buena (clase RMR tipo II), equivalente con cohesiones del orden a 300-400 KPa y ángulos de rozamiento interno de 35 a 45°. Unidad 2.2a, arcillas anaranjadas, ocres y rojizas en tramos métricos, posee una clasificación geomecánica regular (clase RMR tipo III), equivalente con cohesiones del orden a 200-300 KPa y ángulos de rozamiento interno de areniscas, posee una clasificación geomecánica regular (clase RMR tipo III), equivalente con cohesiones del orden a 200-300 KPa y ángulos de rozamiento interno de areniscas, posee una clasificación geomecánica regular (clase RMR tipo III), equivalente con cohesiones del orden a 200-300 KPa y ángulos de rozamiento interno de areniscas, posee una clasificación geomecánica regular (clase RMR tipo III), equivalente con cohesiones del orden a 200-300 KPa y ángulos de rozamiento interno de areniscas, posee una clasificación geomecánica regular (clase RMR tipo III), equivalente con cohesiones del orden a 200-300 KPa y ángulos de rozamiento interno de areniscas, posee una clasificación geomecánica mala (clase RMR tipo IV), equivalente con cohesiones del orden a 100-200 KPa y ángulos de rozamiento interno de entre 15 a 25°.

Las agrupaciones geomecánicas descritas presentan un comportamiento diferencial respecto al peso específico saturado. Así, las agrupaciones 3, 6 y la parte inferior de la 5 poseen un peso específico

saturado (γ Sat) de alrededor de 29 KN/m³; mientras que tanto la parte superior de la unidad 5 (27,7 KN/m³) como la unidad 4 (22,1 KN/m³) poseen valores más reducidos. Otro aspecto interesante es que tanto el techo de la agrupación 5 como toda la 6 presentan cemento calcáreo, por lo que son fácilmente erosionables por la acción meteórica de las aguas.

La principal porosidad de los materiales presentes en el talud es de tipo secundario, aprovechando la tupida red de fracturación, con densidades promedio (en la parte central, agrupación 2) de entre 10 a 26 fracturas /m³, cuyos planos poseen aperturas medias de entre 1 y 10 mm. Aunque no se realizaron estudios de permeabilidad ad hoc, los datos existentes en la literatura para otras unidades del Purbeck del norte de la península aportan consideraciones similares a las observadas en campo. En su conjunto, este tipo de substrato es un aquitardo generando aportaciones reducidas en torno a 0,5 l/s (Sanz Pérez y Martínez, 2004), con bajas permeabilidades de entre 10⁻³ a 10⁻⁵ cm/s (IGME, 2015; MTMAU, 2019) que pueden aumentar hasta llegar a tener a permeabilidades medias gracias a la porosidad secundaria generada por la red de fracturación; aportando transmisividades 10 a 80 m² * día⁻¹ y recargas de 0,066 m³/m² * año⁻¹ (García Gil, 2012). Cabe tener en cuenta que, en otros estudios internacionales de modelización hidráulica, litológicas equivalentes a las estudiadas permiten permeabilidades más ágiles (0,1 a 0,7 m/día). Asimismo, debe hacerse constar la fácil alterabilidad que presentan los materiales de las agrupaciones 6 y 4 en medio acuoso. Esta es razón por la que la porosidad de estos dos últimos materiales ronda el 45 %, frente al 30 % de media frente las restantes unidades geomecánicas que es más reducida.

Aunque las unidades correspondientes a depósitos superficiales no intervienen directamente en la inestabilidad también se clasificaron geomecánicamente. Así, los depósitos fluviales, la Unidad 3 (bloques sueltos con arenas y matriz limoso arcillosa, GW-GP) presenta un comportamiento dispar, los bloques otorgan un comportamiento muy resistente mientras que los componentes de la matriz (arenas limos y arcillosas, SM-SC) posee una resistencia entre 0,10-0,25 MPa y son muy plásticos (MH). La Unidad 4 (limos y arcillas muy plásticas SM-MH) corresponden a depósitos de argayos con resistencias muy bajas (entre 0,10-0,25 MPa) y arcillas muy plásticas remoldeadas (MH). Los coluviones de la Unidad 5 (arenas, limos y arcillas, algún bloque aislado), al igual de los depósitos fluviales, poseen un comportamiento dispar entre los bloques y la matriz. Esta última posee resistencias entre 0,25 y 0,50 MPa, siendo muy plástica, con cohesión 0,7-1,03 Kg/cm² y ángulos de rozamiento interno , φ =46-48°. En cualquier caso, la evolución del comportamiento de los depósitos superficiales no ha sido analizado en más detalle porque su papel en la evolución de la inestabilidad es irrelevante.

<u>Análisis de la evolución de la precipitación como factor desencadenante</u>. Los datos climáticos muestran como 2019 fue un año húmedo (Fig. 3), con máximos de precipitación registrados en invierno y otoño, y algún evento de marcada intensidad registrado a finales del verano. En el evento que desencadenó la inestabilidad en el talud de Ruente, durante enero-febrero de 2019 (con fecha de comienzo el 17 de enero y finalización el 3 de febrero), ha comprendido 32 días con lluvias casi continuas. Las precipitaciones registraron valores casi 3 veces superiores al promedio para ese periodo (Fig. 3). Las máximas intensidades registradas fueron de 102 litros por metros cuadrado en 24 horas (el 24 de enero), y 93,4 litros por metros cuadrado en 24 horas el día anterior. Entre ambos días se recogieron 195,4 mm en la zona.

Tras este evento, las precipitaciones retornaron a valores normales, aunque un poco por debajo de la media (Fig 3). Desde finales del verano hasta principios del invierno, las precipitaciones vuelven a incrementarse por encima de los valores promedio. El total de precipitaciones registradas en la estación de Los Tojos, desde el 1 de julio hasta el 31 de diciembre de 2019 ha sido de 858,2 mm (Fig 3); una cantidad bastante notable para este periodo si la comparamos con el promedio. A finales del estío- principios del otoño se han registrado dos episodios de fuertes precipitaciones, superiores a 80 mm (10 de septiembre y 23 de octubre). Tanto estos dos eventos como otro producido el 18 de agosto (con precipitaciones inferiores a 20 mm pero muy intensas) ocasionaron roturas del talud restaurado (González Díez, 2019). Centrando el análisis exclusivamente en el periodo posterior al estío, las precipitaciones son superiores al promedio, en torno a 1,34 y 2,0 veces.



Fig 3. Datos climáticos (precipitación acumulada mensual en mm y temperatura media diaria en °C) de la estación de Los Tojos (identificador, 1135C; Altitud, 460 m; Latitud, 43°08'49N; Longitud, 04°12'51W), extraídos del Visor del Atlas climático de la Península y Baleares (AEMET, 2022). Los datos de temperatura media diaria °C y de precipitación acumulada mensual (mm) para 2019 han sido tomados de Datos-clima (2021). Como los registros del mes de octubre son nulos se ha tomado para ese mes la temperatura de la estación meteorológica más próxima (Santillana del Mar). La estación de Los Tojos está situada a 9,81 km de Ruente (en línea recta).

<u>Análisis geomorfológico y evolución del talud.</u> Después de la finalización de los trabajos de restauración, aparecieron sobre la cara orientada al oeste signos claros de inestabilidad. Se detectó un incremento del drenaje por las fracturas existentes. El tratamiento de imagen llevado a cabo sobre las imágenes capturadas por los drones ha permitido establecer una estrecha correlación entre las fracturas y la red hidrográfica medida en campo (Fig 4A), evidentemente éstas sirvieron como conducto para desaguar el macizo rocoso saturado. Además, se detectó un incremento en la apertura de las grietas en las fracturas, especialmente aquellas localizadas en la zona tectonizada central de la agrupación 2 (Fig 4A). Este fenómeno sin duda es debido a la descompresión del macizo rocoso con motivo del recorte producido en la ladera.

La superficie total afectada por movimientos a principios del otoño es de más de 770 m² (un 4,3% de la superficie de la actuación). Los datos de campo y el análisis de imagen indican que los rasgos geomorfológicos generados, desde finales del verano, se han modificado con enorme rapidez. Con las primeras lluvias intensas, sucedidas a mediados-finales del verano, comenzaron a localizarse pequeños desprendimientos y flujos superficiales, bajo las áreas más mecanizadas por los planos de anisotropías descritos (Fig 4B). Los desprendimientos afectaron principalmente a las areniscas (agrupaciones 1, 2 y 3), llegando a desplazarse bloques con percentiles de 0,25 m³ formando pequeños campos de acumulación de bloques a su pie.

La superficie afectada a finales de octubre es de más de 1.081 m² (un 28,7% mayor que la anterior). Nuevamente las precipitaciones han modificado los rasgos generados favoreciendo que los flujos superficiales alteren las formas detectadas en la campaña anterior. La cara oriental del talud presenta flujos superficiales de 25 cm de espesor promedio, que afectan a las litologías de las unidades geomecánicas 2, 4 y 5 (Fig 4B). Asimismo, el talud presenta evidencias de la actuación de procesos de descompresión. Los datos indican que el macizo rocoso se está estirando hacia NW y también muestran signos inequívocos de descompresión en las unidades 2 y 3. En esta cara del talud comienza a hacerse patente la aparición de coronas de despegue y la aparición de campos de bloques desprendidos a su pie (bloques con tamaños entre 0,013 y 0,026 m³). En las agrupaciones lutíticas 6

y 7 se desarrollaron flujos superficiales, de 50 cm de espesor. Asimismo, durante el otoño, comenzó a aparecer, en el extremo septentrional del talud, una grieta de más de 30 metros de longitud y 70 cm de profundidad media (grieta 17, Figs 4B y C) compatible con el desarrollo de un deslizamiento de tipo rotacional. No obstante, su pie no mostró plegamientos en punta ni signos de deformación-traslación. El pie del resto del talud presenta un comportamiento muy sólido y estable, no apreciándose signos de inestabilidad en superficiale. En la cara norte del talud (Fig 4C), aparecieron con las lluvias estivales 3 flujos muy superficiales (50 cm de espesor); además, cerca de la cumbre se formó una grieta en arco de 50 cm de profundidad y 20 m de longitud (Fig 4B). Otros elementos geomórficos generados con las lluvias otoñales son: grietas, coronas, escarpes abruptos, signos de reptación en el arbolado. Llama la atención la presencia de grietas a una distancia de 57 m desde la carretera (en proyección horizontal) y a una altura de 281m. Algunas de ellas muestran un movimiento de tipo expansivo, indicativas de que el macizo rocoso está muy afectado por el sistema de anisotropías descrito. También llama la atención la presencia de grietas de descompresión en el substrato rocos. Dichas roturas se sitúan a una altura superior que las comentadas anteriormente y a unos 79 metros de la carretera (en proyección horizontal).

La superficie afectada el 2 de diciembre muestra un incremento de un 20 % en la superficie afectada por desprendimientos y flujos, respecto a los datos tomados a finales de octubre; localizándose la mayoría de los argayos en los taludes W y NW, ligados a las cicatrices que aparecen en las unidades 2 y 3. Otro elemento geomorfológico de relevancia es la presencia de numerosas grietas de tracción abiertas, así como otras sigmoidales. Su análisis estructural permite considerar que el talud se está expandiendo. En la parte superior del talud, junto al arbolado, también aparecen grietas de tracción en la agrupación 9; que llegan a tener saltos de hasta 1 m. En este sector se localizan numerosas grietas radiales que convergen en la corona número 9, lo que indica una acción remontante de la inestabilidad. Sobre la superficie de todo el macizo rocoso aparecen muchos otros signos de deformación que indican que el talud está muy activo.

Seguimiento de la evolución del talud. Las medidas del cambio de las características geomecánicas se presenta en la Tabla 1. Dichas medidas se llevaron a cabo en las estaciones, a lo largo del otoño de 2019, tras los principales eventos de precipitación registrados en la zona los días 10 y 26 de octubre, así como el 2 de diciembre. Los resultados correspondientes al 10 de octubre aportan puntuaciones RMR similares a los obtenidos tras la restauración del talud, conservándose el valor de los parámetros resistentes del macizo rocoso. Esta situación también se aprecia en los test cinemáticos realizados (Fig 4D). A lo largo del otoño, las areniscas amarillentas (unidad litoestratigráfica 2.1) muestran un incremento significativo en el grado de alteración y pérdida del cemento carbonatado (González-Díez, 2019). Las tres agrupaciones geomecánicas (1, 2 y 3) en las que se ha dividido esta unidad muestran signos inequívocos de meteorización. No obstante, este hecho es más patente en las agrupaciones 2 y 3, apreciándose además una pérdida de resistencia en la matriz rocosa. Es precisamente en la agrupación 2, en la que los espaciados promedio de las discontinuidades es menor (entre 1 y 5 metros), donde se detecta la producción de bloques sueltos de entre 1/8 a 1/64 m³. Con el transcurso del otoño de 2019, los valores de RMR obtenidos para cada una de las agrupaciones muestra un progresivo deterioro (Tabla 1). Éste, queda reflejado de manera patente en los correspondientes test cimemáticos efectuados (Fig 4D, E y F). Los datos geomecánicos recopilados para los materiales del sustrato muestran una importante susceptibilidad a la inestabilidad; que, de manera más marcada, se refleja en la zona que está más intensamente mecanizada por las fracturas correspondientes a la familia F1 (agrupación 2). Este hecho queda patente por la aparición de numerosos rasgos de descompresión del macizo rocoso. Asimismo, los registros muestran la influencia en la fuerte meteorización ocurrida durante el otoño en las agrupaciones 1, 2 y 3.

Tomando en consideración todos los datos recopilados se ha estimado que existen seis conjuntos del terreno con comportamiento cinemático independiente (Figs 4G y H). Estos seis conjuntos se han agrupado en cuatro posibles cuerpos atendiendo al tipo de movimiento en masa que es plausible que desarrollen.

El mayor de los movimientos (conjunto 4) estaría compuesto por las agrupaciones 4, 5 y 6 y posee un volumen de más de 51.107m³. Es posible que cada una de ellas pueda adquirir un comportamiento diferenciado independiente en función de movimientos diferenciales. El conjunto 3 afectaría a más

de 11.156 m³, mientras que el 2 involucra a 2250 m³. Por último, el conjunto 1 comprende 1950 m³ y es el de menor importancia.

Tabla 2. Valoraciones de los grupos geomecánicos tomados en las diferentes estaciones geomecánicas descritas, durante las fechas indicadas. Los parámetros considerados aparecen en el margen izquierdo, así como las correcciones por orientación y tipo de actuación, y clase RMR, indicando su equivalencia en los parámetros resistentes de cohesión (kPa) y ángulo de rozamiento interno (phi/°). Basado en Rock Mass Rating, Bieniawski, 1979.

Fecha	10/10/2019	26/10/2019	02/12/2019	10/10/2019	26/10/2019	02/12/2019
Grupo geomecánico	1	1	1	4	4	4
Resistencia de la roca sana	12	12	12	7	7	7
RQD	17	17	17	8	8	8
Espaciado discontinuidades	10	10	10	10	10	10
Estado discontinuidades	22	22	17	12	12	12
Condiciones hidrogeológicas	10	10	10	7	7	7
Suma parcial	71	71	66	44	44	44
Corrección actuación/orientación	-10	-10	-10	-10	-10	-10
RMR final	61	61	56	34	34	34
Clase RMR	II	II	III	IV	IV	IV
C/kPa	300-400	300-400	200-300	100-200	100-200	100-200
phi/°	35-45	35-45	25-35	15-25	15-25	15-25
Grupo geomecánico	2	2	2	5	5	5
Resistencia de la roca sana	12	12	7	12	12	7
RQD	8	8	8	8	8	8
Espaciado discontinuidades	8	8	8	10	10	10
Estado	15	9	3	18	16	10
Condiciones hidrogeológicas	10	7	7	10	7	4
Suma parcial	53	44	33	58	53	39
Corrección actuación/orientación	-10	-10	-10	-5	-5	-5
RMR final	43	34	23	53	48	34
Clase RMR	III	IV	IV	III	III	IV
C/kPa	200-300	100-200	100-200	200-300	200-300	100-200
phi/°	25-35	15-25	15-25	25-35	25-35	15-25
Grupo geomecánico	3	3	3	6	6	6
Resistencia de la roca sana	12	12	12	4	4	4
RQD	17	17	8	8	8	8
Espaciado discontinuidades	10	10	8	8	8	8
Estado	22	22	9	6	6	6
Condiciones hidrogeológicas	10	10	7	7	7	7
Suma parcial	71	71	44	33	33	33
Corrección actuación/orientación	-10	-10	-10	-5	-5	-5
RMR final	61	61	34	28	28	28
Clase RMR	II	II	IV	III	III	III
C/kPa	300-400	300-400	100-200	200-300	200-300	200-300
phi/°	35-45	35-45	15-25	25-35	25-35	25-35

A









F

Е











Fig 4. Procesos activos y evolución geomecánica del talud. A, vista en planta de la red de drenaje medida sobre el talud mediante técnicas de campo y de tratamiento de imagen. B, esquema geomorfológico que muestran los procesos activos detectados en la cara oeste del talud desde el 10 hasta el 26 de octubre de 2019. C, esquema geomorfológico que muestran los procesos activos detectados en la cara norte del talud durante las mismas fechas que en la anterior (D, Deslizamiento planar; F, Flujo; Desp., Bloques desprendidos; en rojo y numeradas en negro las principales coronas de rotura identificadas en la imagen; círculos negros, elipses de expansión). Análisis cinemáticos

correspondientes a los diferentes taludes presentes en la ladera objeto de estudio. D, datos procedentes de las observaciones del 10 de octubre de 2019. E, datos procedentes de las observaciones del 26 de octubre de 2019. F, datos procedentes de las observaciones del 2 de diciembre de 2019. El color indica la clase RMR (Verde, Buenaclase II; Naranja, Media-clase III; Rojo, Mala-clase IV). Las proyecciones presentan el Norte en la horizontal, orientado a la izquierda, conforme el geográfico. Los vértices de las cuñas corresponden a las flechas azules, la punta de la flecha indica el sentido del movimiento. El color de la unidad geomecánica corresponde a su clase RMR promedio. En G y H se presentan respectivamente líneas principales de rotura potencial (rojo grueso discontinuo), identificadas en los taludes N y W. Los números (1-6) indican los nuevos conjuntos con comportamiento cinemático independiente.

5. CONCLUSIONES

Todos los datos hasta ahora presentados, tanto los geomecánicos, como los geomorfológicos, así como la estructura geológica existente, indican que la zona presenta una importante susceptibilidad natural a la génesis y desarrollo de movimientos de ladera. Además, los datos recopilados indican que los movimientos en masa detectados en el talud continuarán desarrollándose en el futuro como consecuencia de la descompresión del macizo rocoso, el progresivo empeoramiento en la calidad geomecánica de los materiales implicados, la estructura geológica desfavorable y, por último, la meteorización del macizo rocoso en este entorno climático presente.

Los ciclos alternantes que se sucedieron, en los que se combinaron momentos en los que el macizo rocoso estuvo expuesto a una alta radiación solar (seco) y después fuertes precipitaciones (saturado), minaron la resistencia de la matriz rocosa de manera sorprendentemente rápida. Estas alternancias entre momentos secos y otros húmedos en el que se sucedieron varios días de lluvia continuada y precipitaciones intensas favorecieron la meteorización de los cementos minerales presentes en las márgenes de las fracturas existentes en el macizo.

Asimismo, los resultados muestran como el uso conjunto de estas técnicas refuerzan el estudio de taludes. Todas ellas han permitido correlacionar las deformaciones topométricas registradas en el talud, con las señales radiométricas capturadas por los drones y con aquellos los sectores cinemáticamente más inestables.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con los fondos del proyecto 29.P114.64004 (Universidad de Cantabria). Los autores agradecen a la Consejería de Obras públicas, ordenación de Territorio y Urbanismo, y a Enrique Gutierrez Marcos, su colaboración en la realización del mismo.

REFERENCIAS

- Abeykoon, T., Gallage, C., Dareeju, B., Trofimovs, J., 2018. Real-time monitoring and wireless data transmission to predict rain-induced landslides in critical slopes. Aust. Geomech. J. 53, 61–76.
- AEMET, 2022. Visor del Atlas climático de la Península y Baleares [WWW Document]. URL https://www.aemet.es/es/web/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_climatico/visor_atl as_climatico
- Bieniawski, Z., 1979. The geomechanics classification in rock engineering applications, in: 4th ISRM Congress.
- Brezzi, L., Gabrieli, F., Cola, S., Lorenzetti, G., Spiezia, N., Bisson, A., Allegrini, M., 2020. Digital Terrestrial Stereo-Photogrammetry for Monitoring Landslide Displacements: A Case Study in Recoaro Terme (VI) BT - Geotechnical Research for Land Protection and Development, in: Calvetti, F., Cotecchia, F., Galli, A., Jommi, C. (Eds.), . Springer International Publishing, Cham, pp. 155–163.
- Bromhead, E.N., 1997. THE TREATMENT OF LANDSLIDES. Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng. 125, 85–96. https://doi.org/10.1680/igeng.1997.29231
- CLIMATE-DATA.ORG, 2022. CLIMATE-DATA.ORG [WWW Document]. URL https://es.climate-data.org/europe/espana/cantabria/ruente-210005/

Datos-clima, 2021. datos Meterológicos [WWW Document]. URL https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitastad2013.php

Gallage, C., Dareeju, B., Trofimovs, J., Wang, L., Uchimura, T., 2018. Real-Time Monitoring and

Failure Prediction of a Slope Due to Rainfall - Case Study. 9th Int. Conf. Sustain. Built Environ. 12–18.

- García Gil, A., 2012. Estudio hidrogeológico e hidroquímico del drenaje subterráneo del macizo del Moncayo en las Tierras de Agreda (Soria). Zaragoza.
- González-Díez, A., 2019. Informe de seguimiento deslizamiento de Ruente (CA-180, Cabezón de la Sal a valle de Cabuérniga, p.k. 7+400), Octubre a final proyecto. Unviversidad de Cantabria.
- González-Díez, A., Bruschi, V.M., Sánchez, J., Bonachea, J., Diaz de terán, J.R., J., R., Fernández, G., Martínez, P., Zarroca, M., Linares, R., Rodriguez, V., San Millán, E., Hoyos, S., Martín, S., 2017. Studying a Landslide in Its Paroxysmal Phase; the Reactivation of the Sebrango Landslide (Spain), June 2013, in: Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K. (Eds.), Advancing Culture of Living with Landslides. Springer Berlin Heidelberg, pp. 163–170. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5
- González--Díez, A., Fernández--Lozano, J., Remondo, J., Bonachea, J., Morellón, M., Fernández-Maroto, G., Martínez-Cedrún, P., Riquelme, A., Sánchez Espeso, J., 2018. El empleo de técnicas fotogramétricas, topométricas y de tratamiento de imagen en la determinación del patrón geomórfico de desprendimientos rocosos, in: Garcia, C., Gómez-Puyol, L., Morán-Tejeda, E., Batalla R.J. (Eds.), Geomorfología Del Antropoceno. pp. 123–126. https://doi.org/ISBN 978---84---09---04850---2
- González-Díez A., Fernández-Maroto, G., Doughty, M.W., Díaz de Terán, J.R., Bruschi, V., Delgado, J., Cardenal, J., Pérez, J.L., Mata, E., 2014. Development of a methodological approach for the accurate measurement of slope changes due to landslides, using digital photogrammetry 615–628. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0413-5
- González de Vallejo, L., Ferrer Gijón, L., 2007. manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocoso en afloramientos, Geología y. ed. IGME, Madrid.
- IGME, 2015. Mapa Litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España a escala 1:200.000.
- ISRM, 1981. Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. Pergamon Press.
- Kazmi, D., Qasim, S., Harahap, I.S., Baharom, S., Mehmood, M., Siddiqui, F.I., Imran, M., 2017. Slope Remediation Techniques and Overview of Landslide Risk Management. Civ. Eng. J. 3, 180–189. https://doi.org/10.28991/cej-2017-00000084
- Markland, J.T., 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. London.
- MTMAU, 2019. ESTUDIO INFORMATIVO DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD NOGALES DE PISUERGA – REINOSA.
- Popescu, M.E., Sasahara, K., 2009. Engineering Measures for Landslide Disaster Mitigation BT -Landslides – Disaster Risk Reduction, in: Sassa, K., Canuti, P. (Eds.), . Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 609–631. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_32
- Racek, O., Blahut, J., Hartvich, F., 2021. Observation of the rock slope thermal regime, coupled with crackmeter stability monitoring: Initial results from three different sites in Czechia (central Europe). Geosci. Instrumentation, Methods Data Syst. 10, 203–218. https://doi.org/10.5194/gi-10-203-2021
- Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Sarro, R., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L., Abellán, A., Gerardo, H., 2017. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL TALUD DESPRENDIDO EN CORTES DE PALLÁS (VALENCIA) MEDIANTE STRUCTURE FROM MOTION (SFM) CON IMÁGENES ADQUIRIDAS CON REMOTELY PILOTED.
- Sanz Pérez, E., Martínez, A., 2004. Hidroestratigraf{\'\i}a e hidrogeoqu{\'\i}mica de la Facies Weald del Noroeste de la Cordillera Ibérica (Región de Pinares, Soria), in: VIII Simposio de Hidrogeología. Asociación Española de Hidrogeólogos. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), pp. 155–164.
- Winter, M.G., Nettleton, I.M., Seddon, R., Leal, D., Marsden, J., Codd, J., 2022. Assessment of Innovative Slope Repair Techniques BT - Advances in Transportation Geotechnics IV, in: Tutumluer, E., Nazarian, S., Al-Qadi, I., Qamhia, I.I.A. (Eds.), . Springer International Publishing, Cham, pp. 635–647.