



# MODELIZACIÓN DE CAÍDA DE ROCAS EN LOS ACANTILADOS CARBONATADOS “TIPO FLYSCH” DE LA PLAYA DE ATXABIRIBIL (SOPELA, BIZKAIA): ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL

*Modeling of rockfall in the carbonate flysch cliffs of Atxabiribil beach (Sopela, Bizkaia): three-dimensional analysis*

Jon Ander Clemente Momoitio, Jesus Angel Uriarte Goti, Arturo Apraiz Atucha y Tomás Morales Juberías

Departamento de Geología de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Barrio Sarriena S/N, 48940 Leioa, España.  
[jonander.clemente@ehu.eus](mailto:jonander.clemente@ehu.eus); [jesus.uriarte@ehu.eus](mailto:jesus.uriarte@ehu.eus); [arturo.apraiz@ehu.eus](mailto:arturo.apraiz@ehu.eus); [tomas.morales@ehu.eus](mailto:tomas.morales@ehu.eus).

**Abstract:** coastal cliffs attract millions of people every year for their landscape, natural and recreational value. However, these spaces develop instability processes that condition the practice of users, as well as their safety. For this reason, there is a need to develop detailed studies of instabilities, which allow the development of specific actions to ensure the safety and preserve the nature of these environments. The study carried out on Atxabiribil beach (Sopela, Bizkaia) seeks to understand the dynamics of rockfall on coastal cliffs and to develop three-dimensional models that reflect the observed reality. The modeling allows the simulation of individual rockfall trajectories, their lateral evolution, energy and reach, as well as detailed diagrams. This study allows advancing proposals based on informative measures and specific warnings with the delimitation of areas of greater process activity, seeking safety while the naturalness of the environment is maintained, avoiding constructive interventions.

**Keywords:** coastal cliffs, rockfalls, three-dimensional analysis.

**Resumen:** los acantilados costeros atraen a millones de personas cada año por su valor paisajístico, natural y recreativo. Sin embargo, estos espacios desarrollan procesos de inestabilidad que condicionan el uso de los visitantes, así como su seguridad. Por esta razón, existe la necesidad de elaborar estudios detallados de inestabilidades, que permitan desarrollar actuaciones específicas que garanticen la seguridad y conserven la naturaleza de estos entornos. El estudio realizado en la playa de Atxabiribil (Sopela, Bizkaia) busca conocer las dinámicas de caída de rocas en los acantilados costeros y desarrollar modelos tridimensionales que reflejen la realidad observada. La modelización permite simular trayectorias individuales de caída de rocas, su evolución lateral, energía y alcance, así como realizar diagramas detallados. Este estudio permite avanzar propuestas basadas en medidas informativas y advertencias específicas con la delimitación de áreas de mayor actividad de procesos, buscando la seguridad mientras la naturalidad del entorno se mantiene, evitando las intervenciones constructivas.

**Palabras clave:** acantilados costeros, caída de rocas, análisis tridimensional.

Clemente, J.A., Uriarte, J.A., Apraiz, A., Morales, T., 2021. Modelización de caída de rocas carbonatadas “tipo flysch” en el acantilado de la playa de Atxabiribil (Sopela, Bizkaia): análisis tridimensional. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 34 (2): 60-70

## Introducción

Las regiones costeras son la residencia de más de 1.200 millones de personas a lo largo del mundo (Tonmoy *et al.*, 2018). De estos espacios, se estima que entre el 52 y el 80% están limitados por acantilados costeros (Emery y Kuhn, 1982; Young y Carilli, 2019) que pueden contactar directamente con el mar, y evolucionar hacia rasas mareales o playas.

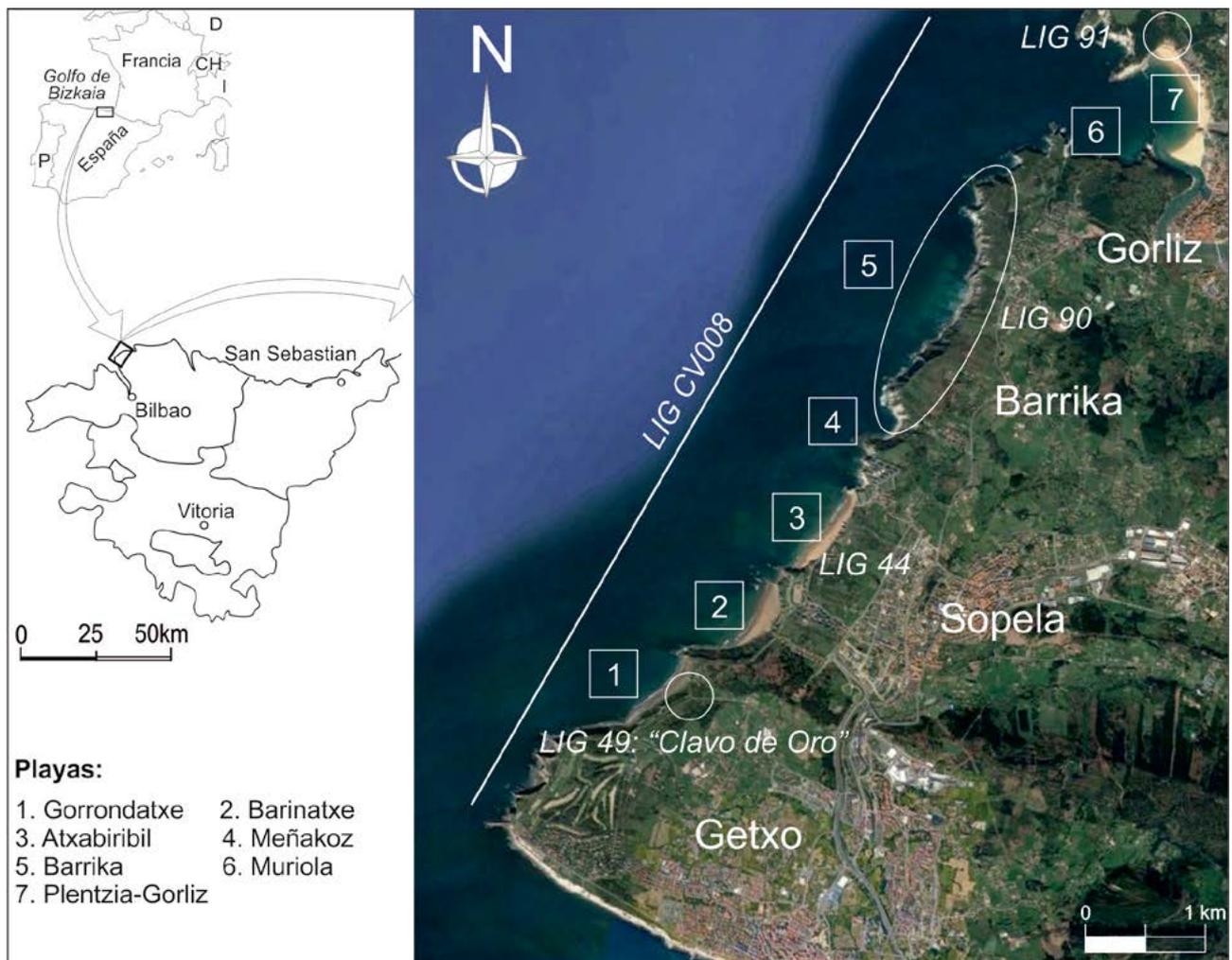
Estos espacios son de uso continuo, tanto por parte de la población local, como por su uso estival y turístico. En este sentido, a lo largo de las últimas décadas, han sufrido el desarrollo, a veces incontrolado, del urbanismo, con la invasión de espacios y la degradación del paisaje natural.

Por otra parte, estos espacios destacan por una alta dinámica litoral, en la que se incluyen procesos de inestabilidad, como la caída de rocas, que es un proceso de alta recurrencia y complejidad, resultado de factores geológicos

y meteorológicos, que dan lugar a una gran variabilidad de dinámicas. En este contexto, la caída de rocas destaca como un proceso que se registra prácticamente en la totalidad de costas con afloramientos rocosos.

La Costa Vasca, en la que se desarrolla el estudio, se extiende a lo largo de 176 kilómetros. En ella, una parte importante de los acantilados costeros se desarrolla en alternancias sedimentarias de materiales carbonatados y siliciclásticos tipo *flysch*. En zonas protegidas se desarrollan playas, limitadas hacia el continente por acantilados que llegan a alcanzar alturas de 30 a 60 metros, en las que se registran continuos procesos de inestabilidad, especialmente caída de rocas, particularmente peligrosas para las personas en verano. Ejemplos de playas con estas características son la playa de Itzurun en Gipuzkoa (Morales *et al.*, 2021), y Atxabiribil, Barrika y Muriola en la costa de Uribe.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es plantear un estudio de detalle de los acantilados de la playa



**Fig. 1.-** Contexto geográfico, playas y Lugares de Interés Geológico (LIG) de la costa de Uribe. LIGs: CV008, Costa de Uribe; 44: Límite K/T Sopela (K/Pg en la actualidad); 49: Ypresiense-Luteciense de Gorrondatxe (GSSP); 90: Paleorrassa de Barrika; 91: Dunas fósiles de Astondo.

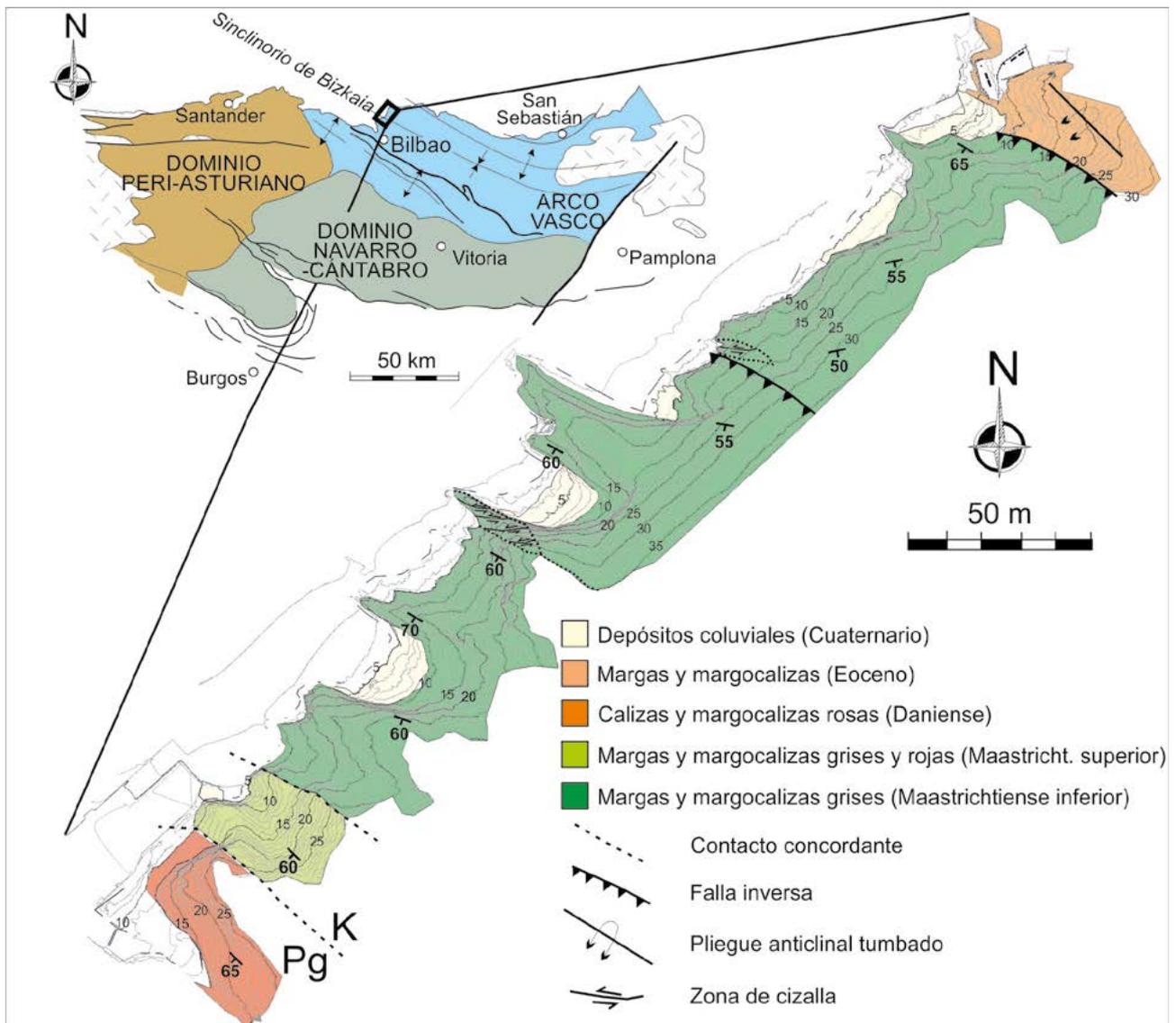
de Atxabiribil, que fueron modificados por la Demarcación de Costas del País Vasco en los años 80 a 90, con la eliminación de parte de los resaltes naturales al considerar que hacían peligrar la seguridad de los usuarios. Esta actuación generó en su momento una notable controversia. En la actualidad, la zona se encuentra protegida como zona de especial protección y mejora ambiental por el Plan Territorial Sectorial de Protección y Ordenación del Litoral de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), por lo que las actuaciones constructivas no están recomendadas y, dado que los acantilados están en contacto directo con la playa, las actuaciones de prevención, señalización e información adquieren un carácter prioritario (Morales *et al.*, 2021). Para el desarrollo de las mismas, es necesario conocer el origen, evolución y desarrollo de procesos gravitacionales en los taludes actuales. Para ello se ha generado un Modelo Digital del Terreno y una cartografía de detalle, se han caracterizado litológicamente los materiales en campo y laboratorio, se han estudiado la tipología de roturas, frecuencia y entidad de las mismas, y se han desa-

rollado modelizaciones 3D que han permitido el análisis tridimensional de la caída de rocas sobre la playa.

### Contexto geográfico y geológico

La playa de Atxabiribil, con una longitud próxima a los 800 metros, forma parte de la conocida costa de Uribe en el litoral de Bizkaia (Fig. 1). La costa de Uribe tiene una longitud total de 13 kilómetros, desde el municipio de Getxo hasta Górliz, como límite septentrional. Todo el sector costero está reconocido geológicamente como Lugar de Interés Geológico (LIG CV008), principalmente por su valor geomorfológico, con un litoral acantilado prácticamente constante, playas de arena en entrantes protegidos, y el estuario del río Butroe. Sopela, municipio en el que se localiza la playa de Atxabiribil, recibe en los meses estivales una de las mayores afluencias de visitantes de todo el litoral de la comarca.

Desde un punto de vista geológico, el área de estudio se encuentra en la denominada Cuenca Vasco-Cantábrica,



**Fig. 2.-** Contexto geológico regional del área de estudio y de las estructuras principales de la Cuenca Vasco-Cantábrica (modificado de Feuillé y Rat, 1971). A la derecha se indica el mapa geológico del área de la playa de Atxabiribil.

y más concretamente en el flanco noreste del Sinclinorio de Bizkaia (Fig. 2), dentro del Arco Vasco (Feuillé y Rat, 1971; Ramírez del Pozo, 1973). La evolución tectosedimentaria de esta cuenca es compleja, y comienza con una fase extensiva desarrollada durante el Mesozoico, particularmente durante el Cretácico, con una tasa de subsidencia elevada que dio lugar a una acumulación de materiales de gran potencia. Esta sedimentación se desarrolló en un fondo de cuenca (1000-1500 m) (Pujalte *et al.*, 1998) en el que alternan series continuas de pares marga-caliza, zonas predominantemente margosas y eventos turbidíticos carbonatados eventuales procedentes del continente, en función de los ciclos de Milankovitch (Dinarès-Turell *et al.*, 2013; Batenburg *et al.*, 2014).

Posteriormente a la etapa extensiva, en la Cuenca Vasco-Cantábrica se desarrolló un gran evento compresivo durante la Orogenia Alpina, que elevó los materiales de fondo de cuenca previamente mencionados plegándolos. En este contexto, se desarrolló un sistema de fallas inversas subparalelas a la estratificación (70 buzamiento/210 dirección), que definen un movimiento cabalgante general hacia el norte, que se reconocen también en la playa de Atxabiribil (Fig. 2).

En cuanto a las litologías que afloran en los acantilados que bordean la playa de Atxabiribil, los materiales predominantes son sucesiones de pares de margas y margocalizas grises depositadas en un fondo de cuenca en el Maastrichtiense inferior (Álvarez-Llano *et al.*, 2006), que son el material más antiguo del área de estudio. Para el mismo periodo geológico, destaca un afloramiento de aproximadamente 20 metros de margas y margocalizas grises y rojas del Maastrichtiense superior, depositados en un ambiente similar al anterior, que representan el último episodio sedimentario previo al límite con el Cenozoico (Iridoy *et al.*, 2010; Dinarès-Turell *et al.*, 2013). El límite Cretácico-Paleógeno (K/Pg) ha sido definido en la playa de Atxabiribil (LIG 44), y contiene un nivel rico en iridio con origen en el impacto meteorítico de hace 65 millones de años, que marca un cambio en el contenido de foraminíferos en ambos lados del citado límite (Lamolda *et al.*, 1983). En concreto, la unidad inferior al límite es la definida como una alternancia de margas y margocalizas grises y rojas, que progresivamente desarrollan menor cantidad de estratos margocalizos, con un nivel margoso de color rojo en los últimos metros (Dinarès-Turell *et al.*, 2013). La unidad suprayacente está formada por las calizas rosas del Daniense (Apellániz *et al.*, 1983), que está constituida por calizas pelágicas de colores rosados y grises. Este sector es particularmente accesible desde que en el año 2008 y en aplicación de la Ley de Costas (Ley 22/1988, de 28 de julio) se derribaron los locales comerciales construidos en la zona. Por último, el material más joven, del Eoceno, aflora de forma discordante al noreste del área de estudio, en relación al contacto mecánico en una zona altamente tectónica por la Orogenia Alpina. Se trata de una alternancia de margas y margocalizas, similar a las descritas para el Cretácico, pero que destacan por una mayor presencia de eventos turbidíticos y, como se ha indicado, por una mayor deformación tectónica, que da lugar a pliegues, estructuras

de cizalla e incluso inversión tectónica (Rodríguez *et al.*, 2008). De esta forma, el sistema de fallas inversas dispone, en este sector norte, los materiales del Maastrichtiense por encima de los materiales Eocenos.

## Metodología

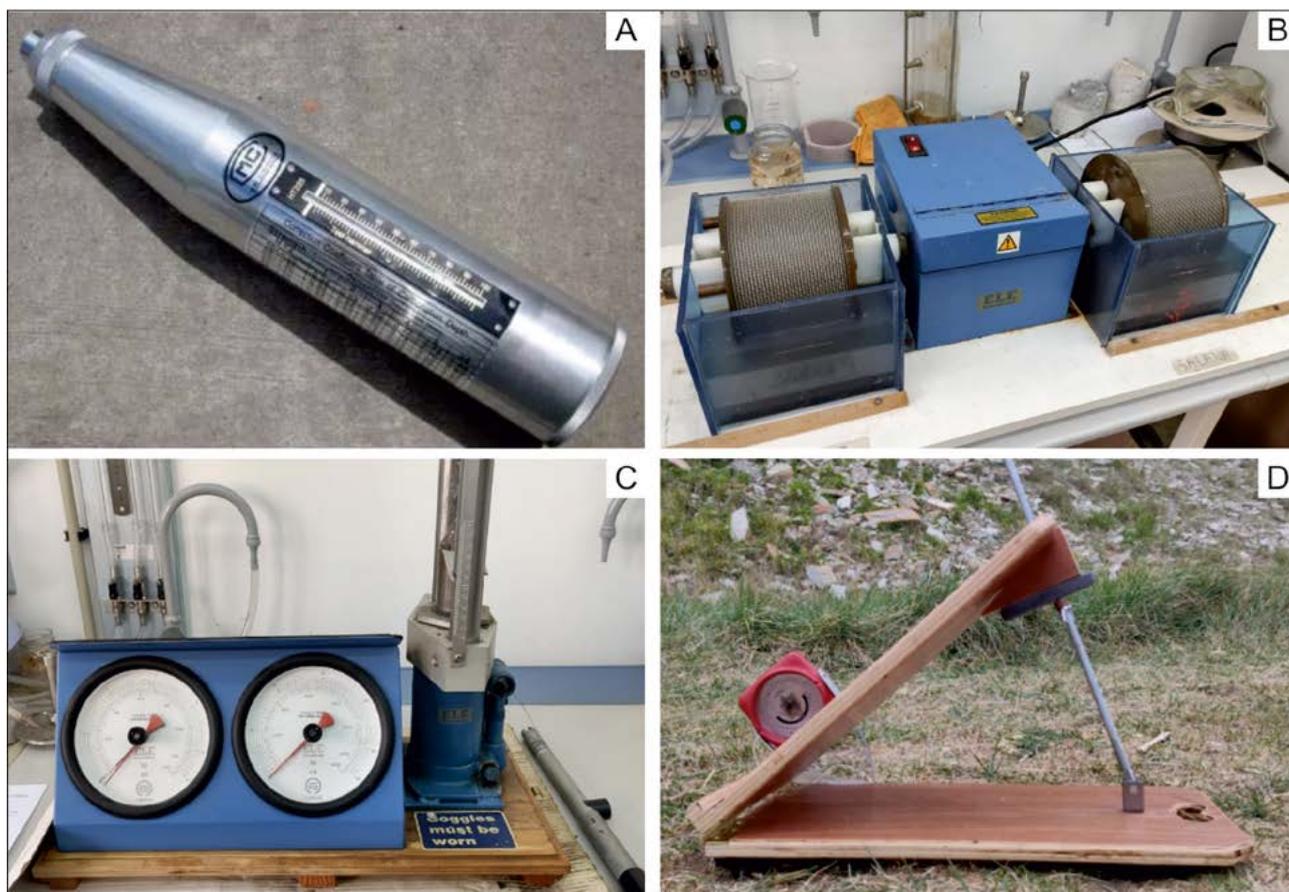
### Información geográfica de detalle

La primera fase del trabajo ha consistido en la obtención de un Modelo Digital del Terreno, generado a partir de una nube de puntos tridimensional de detalle. Para ello, el área de estudio ha sido digitalizada mediante un equipo de Láser Escáner Terrestre (TLS) modelo FARO Focus 3D 330. Las nubes de puntos generadas mediante el TLS se utilizan en numerosas aplicaciones (Li *et al.*, 2020), entre las que destacan la reconstrucción tridimensional de modelos (Dong *et al.*, 2020) y la gestión del patrimonio de monumentos históricos construidos (Margottini y Spizzichino, 2014; Margottini *et al.*, 2016; Spizzichino *et al.*, 2019). Es fundamental que la información generada a partir del TLS en el campo, y que se establece con un sistema de coordenadas específico del área de estudio, sea convertida a un sistema de georreferenciación estándar, con el fin de facilitar no solo la combinación de esta información con documentos previamente generados, sino para facilitar la estandarización de todos los datos en un sistema común (Fan *et al.*, 2015; Pandzic *et al.*, 2017).

A partir de esta información, se obtiene una topografía de detalle con una equidistancia entre curvas de nivel de 20 cm, que sirve de base para el trabajo de campo, y la nube de puntos previamente mencionada, que es utilizada para la modelización (Morales *et al.*, 2021). En este sentido, se ha combinado la información generada con ortofotografías descargadas desde la Infraestructura de Datos Espaciales GeoEuskadi (<https://www.geo.euskadi.eus/s69-15375/es/>). El conjunto de la información se ha georreferenciado mediante la herramienta SIG (Sistemas de Información Geográfica) QGIS 3.8.

### Caracterización geomecánica

La caracterización geomecánica de los materiales de los acantilados, se ha realizado mediante el índice de calidad RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989). Este índice incluye 5 parámetros de partida: resistencia a compresión simple de la roca, que obtenemos en campo mediante el Martillo de Schmidt (Fig. 3A); el valor de RQD (*Rock Quality Designation*) de Deere *et al.* (1967), que obtenemos a partir del número de juntas, que en nuestro caso corresponden al sistema de diaclasas y a la estratificación, por metro cúbico (Jv); espaciado de las discontinuidades; estado/meteorización y presencia de agua. Además de estos parámetros se determina el grado de alterabilidad de los materiales menos resistentes de los acantilados mediante el *Slake Durability Test* (Fig. 3B). La resistencia a compresión simple de los materiales competentes se verifica en laboratorio mediante el ensayo de carga puntual (Fig. 3C). Finalmente, se realizan ensayos de inclinación o *Tilt*



**Fig. 3.-** Equipos utilizados para la caracterización de parámetros resistentes de los materiales. A) Martillo de Schmidt. B) Slake Durability test. C) Carga puntual. D) Tilt test.

Test para determinar el ángulo de rozamiento residual de las juntas del macizo (Fig. 3D) y la rugosidad de las juntas o JRC (*Joint Roughness Coefficient*) mediante un perfilómetro de contacto.

#### Análisis de inestabilidades

El trabajo de campo se completa con el reconocimiento general de inestabilidades del área de estudio. La orientación, continuidad y desarrollo de las distintas familias de discontinuidad en los acantilados determina los procesos de inestabilidad, que son, a su vez, los precursores de las caídas de rocas.

Con el objetivo de desarrollar un análisis geométrico de los procesos potenciales de inestabilidad, se han realizado proyecciones estereográficas sobre falsilla de *Wulff* mediante el programa Dips.v.6.0. de RocScience (RocScience, 2013). Este programa permite sintetizar la información de medida de planos recogida en el campo y realizar análisis cinemáticos para cada posible proceso de inestabilidad.

Los resultados obtenidos son contrastados con observaciones de campo, realizadas mediante revisiones periódicas en la zona durante los 3 años de duración de esta investigación, y una vez establecidos los procesos de caída de rocas, se identifican las áreas fuente más activas, zonas de acumulación de bloques desprendidos, alcance desde el pie del talud y posible trayectoria. Esta información se recoge en la cartografía de detalle y posteriormente se compara

con las modelizaciones. Junto con la dinámica del proceso, se caracteriza la morfología, dimensiones y peso de las rocas desprendidas mediante dinamómetros, lo que permite realizar simulaciones realistas del entorno.

#### Modelización

La modelización se realiza mediante el *software* RocPro3D (RocPro3D, 2014), que permite analizar la dinámica de caída de rocas en tres dimensiones. El primer paso es obtener, mediante triangulación, una malla tridimensional sobre la que simular los procesos considerados a partir de la nube de puntos previamente generada. Sobre esta malla se definen los distintos materiales identificados en el área de estudio. En nuestro caso se diferencian básicamente: zonas de afloramiento rocoso, zonas de vegetación, zonas de playa y zonas construidas. Cada uno de estos terrenos condiciona, mediante una serie de parámetros característicos, la evolución de la caída de rocas en función de la energía que retiene el terreno en los impactos, principalmente mediante los coeficientes de restitución normal ( $R_n$ ), tangencial ( $R_t$ ) y ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) (Pfeiffer y Bowen, 1989).

Los resultados permiten identificar las zonas donde la caída de rocas alcanza una mayor energía, altura y velocidad, que resulta fundamental a la hora de elaborar propuestas de gestión preventivas e informativas, que son las recomendadas en la playa de Atxabiribil.

## Resultados

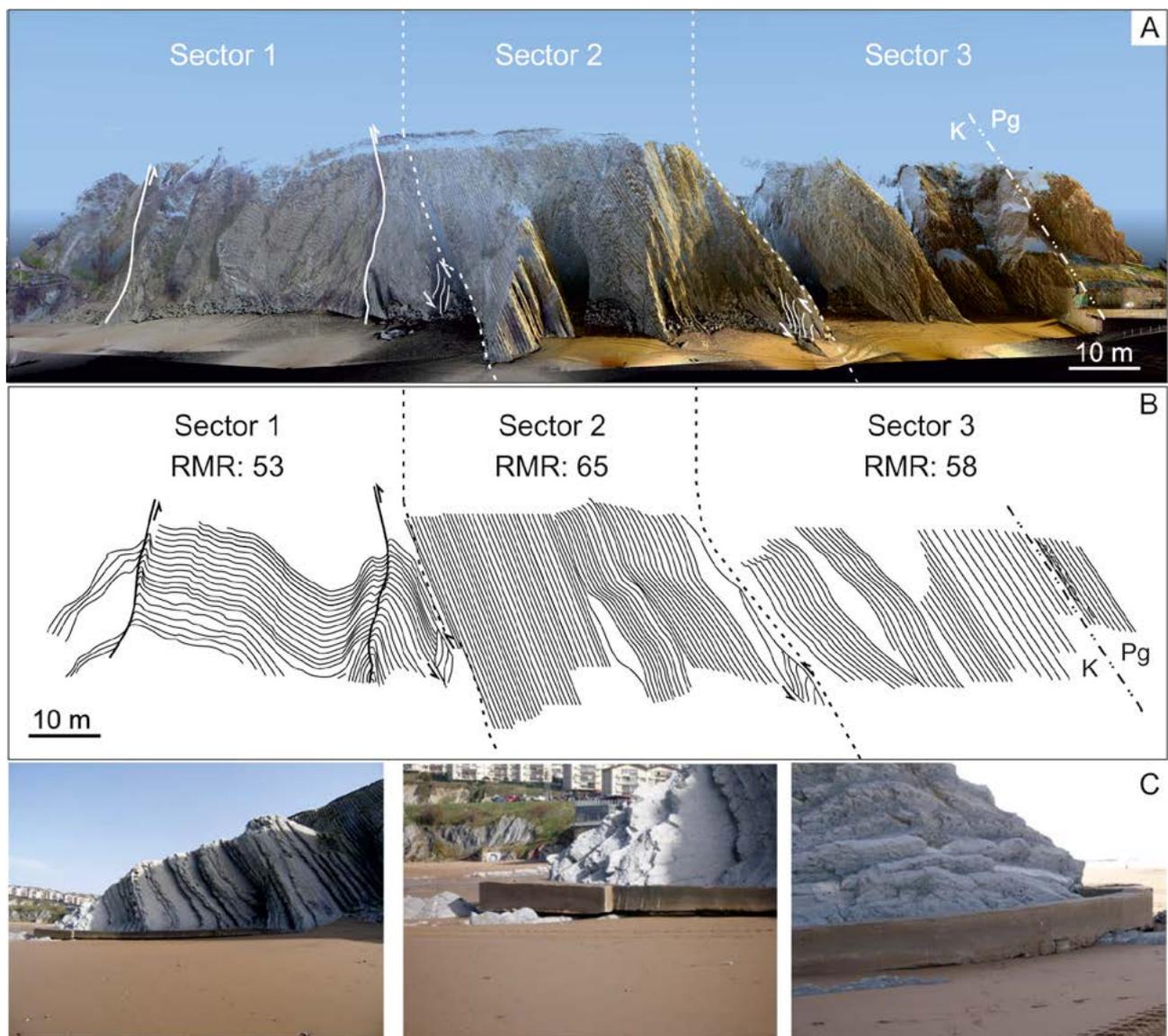
### Sectorización del acantilado

Teniendo como punto de partida la caracterización geomecánica del acantilado, se han diferenciado a lo largo de la playa 3 sectores en función de: la disposición general de los materiales respecto al talud del acantilado, el comportamiento frente a la erosión, la tipología de roturas dominantes y los usos de la playa (Fig. 4A, B). El primer sector (1), de menor calidad general del macizo (RMR:53), se desarrolla en el acceso norte de la playa y destaca por un mayor desarrollo de la fracturación, con una orientación general de la estratificación hacia el interior del acantilado. En el sector central (2) de la playa el macizo es de mayor calidad (RMR:65), con una notable continuidad de la estratificación y dominio de los materiales más competentes, lo que favorece el desarrollo de un saliente en el acantilado; a diferencia del sector previo, la estratificación se dispone

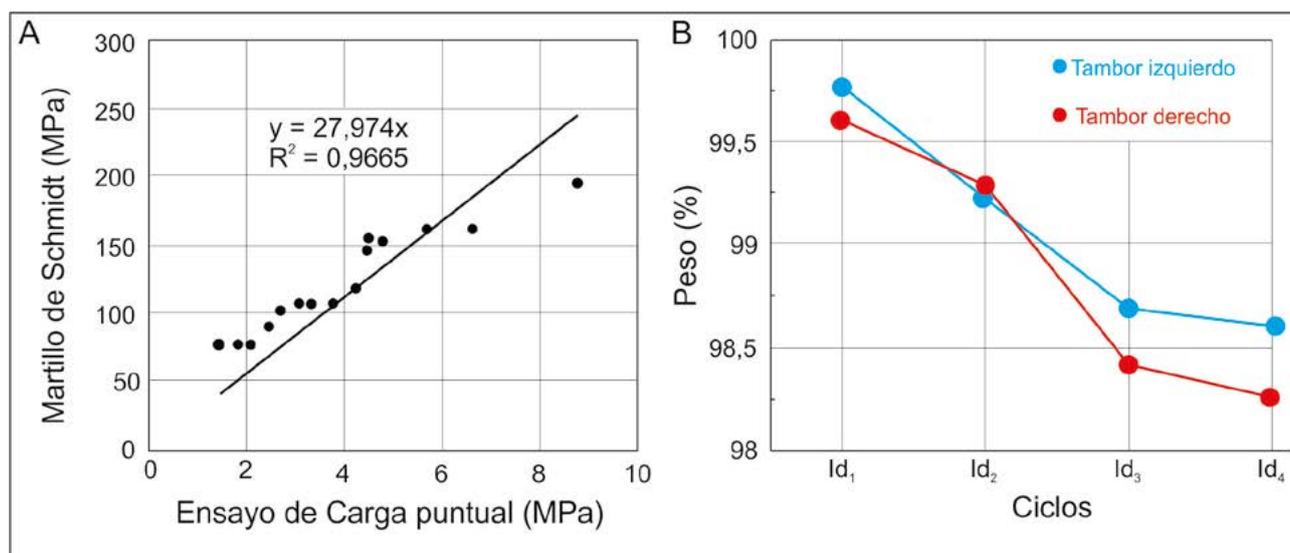
perpendicularmente a la línea de costa. Por último, el tercer sector (3), de calidad intermedia (RMR:58), se desarrolla en la zona de acceso sur a la playa; los estratos presentan también una marcada continuidad y al igual que en el sector central se disponen perpendicularmente a la línea de costa. Es importante añadir que en el sector 2 de la playa se instaló un muro de hormigón prácticamente continuo, con el objetivo de proteger el saliente del efecto del oleaje, lo que evita que la dinámica erosiva de la zona sea natural (Fig. 4C).

En lo que se refiere a las determinaciones de parámetros resistentes, los ensayos de campo y laboratorio se han centrado en los materiales del Maastrichtense inferior y superior, que abarcan la mayor parte del área de estudio.

Para los materiales más competentes (margocalizas), se ha desarrollado una comparativa entre los valores de resistencia a compresión simple obtenidos en el campo mediante el martillo de *Schmidt* y los del ensayo de carga puntual *Point Load* de laboratorio (Fig. 5A). Ambos valores mues-



**Fig. 4.-** A) Nube de puntos y sectorización de la playa de Atxabiribil. B) Disposición de materiales, estructuras tectónicas principales y valores de *Rock Mass Rating* (RMR) por sectores. C) Fotografías de la instalación del muro de hormigón en el sector 2, año 2008 (cortesía de Javier Elorza).



**Fig. 5.-** Resultados gráficos de los ensayos de caracterización de materiales. A) Comparación entre los valores de resistencia a compresión simple obtenidos a partir del ensayo de carga puntual y esclerómetro o martillo de *Schmidt*. B) Pérdida de porcentaje de peso mediante *slake durability test*.

tran una clara correlación y varían entre 75 y 180 MPa, lo que equivale a una roca muy resistente (100-250 MPa).

Respecto de los materiales menos competentes (margas), los ensayos de durabilidad (*Slake Durability Test*) han permitido calcular su pérdida de peso después de 3 ciclos del ensayo. Esta pérdida supone únicamente un 2% del material, con una evolución muy similar en ambos tambores (Fig. 5B), lo que permite identificarlos como muy poco alterables. Destacar que este ensayo se desarrolla en ciclos de 10 minutos y caracteriza una degradación de naturaleza fundamentalmente física. No tiene en cuenta procesos de evolución más lenta y compleja, con componentes químicos y biológicos.

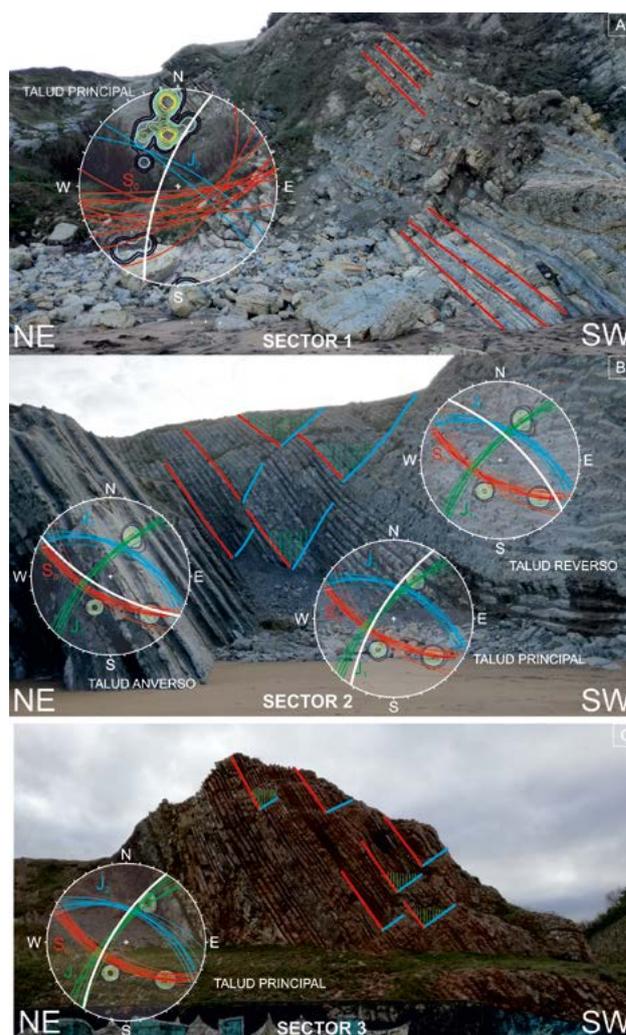
#### Tipología y caracterización de inestabilidades

En cuanto a la tipología de inestabilidades, la distinta orientación de materiales por sectores indicada en el apartado previo, da lugar a formas de rotura diferenciadas entre el sector 1 y los sectores 2 y 3.

En el sector 1, el talud principal tiene una orientación 80/285, y la estratificación presenta una orientación media (60/150), lo que dispone los estratos hacia el interior del acantilado, de forma general, como se ha indicado anteriormente. La labor erosiva del oleaje y las mareas favorece su descalce, dando lugar a movimientos rotacionales de bloques individuales (*single block toppling*, Alejano *et al.*, 2010) que se desprenden de la masa rocosa, y más complejos, que involucran un volumen mayor de materiales. Ambos casos tienen una cierta componente de flexión y permanecen en gran medida unidos al macizo (*flexural toppling*), como el que se observa en la figura 6A.

En los sectores 2 y 3, se identifican tres familias de discontinuidad principales relativamente constantes. Destaca una estratificación muy continua ( $S_0$ : 60/210), oblicua al acantilado (con ángulos próximos a 90°), y dos familias de juntas con orientaciones: 75/305 ( $J_1$ ) y 30/030 ( $J_2$ ). En estos sectores, además del talud principal (70/295), la erosión diferencial da lugar a dos taludes adicionales enfrentados

(Fig. 6B), uno sobre el techo de los estratos (talud anverso: 70/210) y otro a su base (talud reverso: 65/050). La interacción de estas tres familias da lugar a distintos procesos



**Fig. 6.-** Tipología de roturas y proyección estereográfica por sectores. A) Sector 1. B) Sector 2. C) Sector 3.

de inestabilidad, identificados tanto en campo como en las proyecciones estereográficas. En el talud principal, la estratificación ( $S_0$ ) y la junta  $J_2$  dibujan claras morfologías en cuña, limitadas hacia el interior por la junta  $J_1$ , próxima a la vertical (Fig. 6B, C). En todo caso, dada la escasa inclinación de la línea de intersección entre los planos  $S_0$  y  $J_2$ , no se registran deslizamientos de cuñas de tamaño reseñable. Sin embargo, dado que se trata de una alternancia de niveles decimétricos de materiales, las roturas, limitadas por los planos citados, se desarrollan como desprendimientos de bloques individuales, que en su conjunto dan lugar a los vaciados en forma de cuñas de desarrollo métrico que se observan en el talud (Fig. 6B, C). En el talud anverso, la rotura más característica es el deslizamiento de estratos capa sobre capa, con un plano de rotura paralelo al del talud, y una potencia del elemento que desliza pequeña en comparación con su longitud, asimilable a un talud infinito (Matos Fernandes, 2020). En el reverso, se desarrollan taludes en extraplomo en los que se registran abundantes desprendimientos de fragmentos rocosos por vuelco.

Una vez reconocidos los materiales y establecida la tipología de inestabilidades, se procede a caracterizar los desprendimientos: áreas fuente, actividad, zonas de acumulación, trayectorias, tamaño y peso de los bloques.

La figura 7A recoge las principales áreas activas en los últimos 3 años, las zonas de acumulación preferencial y se establece la línea de máximo alcance de bloques individuales. En lo que se refiere a los bloques desprendidos, se han realizado un total de 89 medidas de tamaño y peso sobre las caídas identificadas y registradas en las visitas trimestrales realizadas al entorno durante los 3 años de desarrollo de esta investigación. Se discriminan las rocas de menos de 1 kilogramo por razones de operatividad, y se obtiene la distribución recogida en la figura 8, censurada en

esta cota inferior. La distribución obtenida es de carácter potencial, con un gran número de bloques de menor tamaño y peso, que progresivamente desciende a medida que aumenta el peso. Los valores máximos alcanzados para las rocas desprendidas en el periodo de investigación son de 28 kilogramos. Indicar a este respecto, que en los depósitos se observan bloques caídos de mayor tamaño y peso. Aunque parte de los mismos pueden tener un origen natural, también podrían estar relacionados con las actuaciones de estabilización realizadas en años previos en la playa y sus acantilados. Esta situación incide directamente en la energía alcanzada por los desprendimientos, por lo que será considerada en posteriores fases de esta investigación.

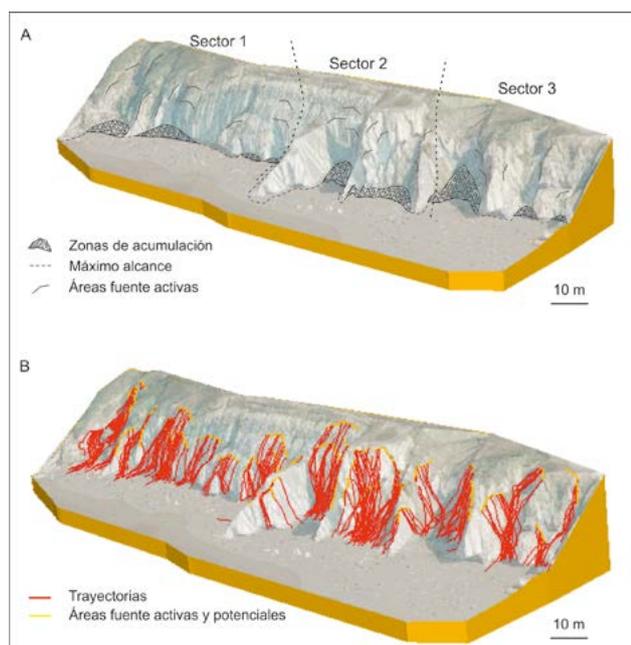
### Modelización de caída de rocas en 3D

A partir de la información previa, se ha realizado una modelización de conjunto de la playa de Atxabiribil (Fig. 7B). Para ello, se superpone a la malla tridimensional previamente generada la ortofoto georreferenciada y se establecen sobre el modelo los distintos tipos de terreno básicos considerados en esta aproximación: *flysch*, *debris*, vegetación y playa.

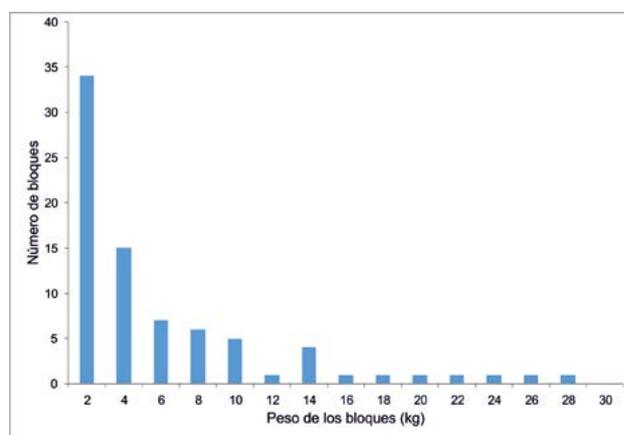
Seguidamente, se marcan sobre el modelo las áreas fuente activas y potenciales identificadas en campo, y se establece para cada una de ellas el número de trayectorias a modelizar. En el caso de la playa de Atxabiribil, se han definido 23 áreas fuente activas y 12 potenciales, que se sitúan principalmente en los estratos más competentes de los acantilados, y se han realizado un total de 350 simulaciones de caída de rocas, 10 por cada zona. En cuanto al peso de los bloques, se ha considerado un valor de 28 kilogramos, que es el peso máximo registrado en el apartado previo y que ofrece, por tanto, los valores mayores de energía.

La calibración del equipo y de los parámetros resistentes de los terrenos definidos permiten ajustar el modelo para asemejarlo al máximo a la realidad. Siguiendo las orientaciones indicadas en el programa, los parámetros finales utilizados en la modelización correspondientes a restitución normal, tangencial, rozamiento y desviación estándar, se recogen en la tabla 1.

Como resultado, cada línea roja en la figura 7B es una



**Fig. 7.-** A) Modelo tridimensional de la playa de Atxabiribil e identificaciones en campo. B) Simulación 3D de caídas de rocas: trayectorias (líneas rojas) y áreas fuente activas y potenciales (líneas amarillas).



**Fig. 8.-** Histograma de medidas de peso de caídas de roca registradas.

caída de rocas individual, de la que podemos reconocer su trayectoria, tanto frontal como lateral, su alcance desde el pie del talud y energía tanto en su recorrido como de impacto. Las acumulaciones se encuentran mayoritariamente en la base del acantilado y en los entrantes generados por la erosión diferencial, y los máximos alcances de las rocas son de 5 metros desde el pie de talud, aunque principalmente alcanzan máximos de entre 2 y 3 metros (Fig. 7B).

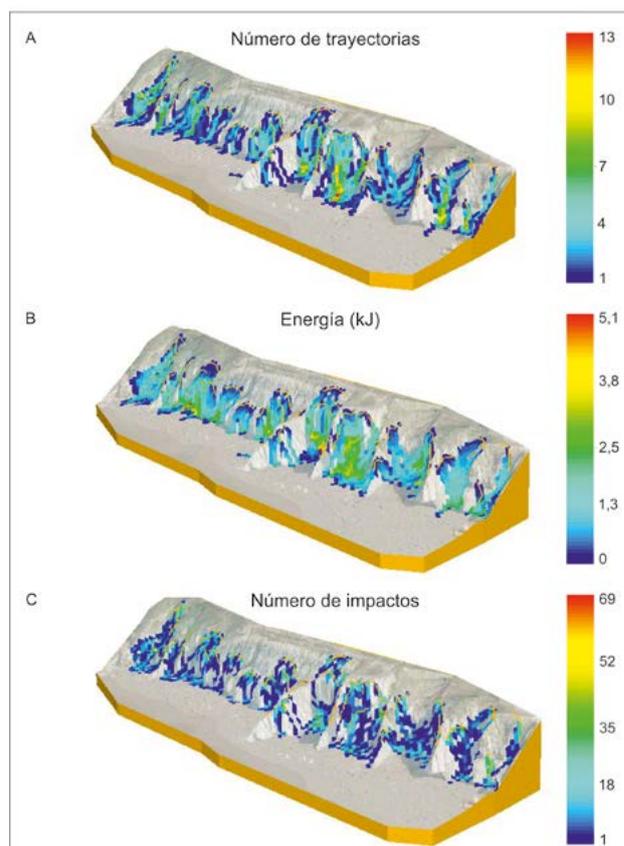
		Rn	Rt	$\phi$	Std
Terrenos	Flysch	0,6	0,9	39	0,4
	Debris	0,5	0,8	39	0,3
	Vegetación	0,3	0,5	30	0,3
	Playa	0,3	0,3	30	0,3

**Tabla 1.** Valores empleados en la modelización de los desprendimientos: Rn: coeficiente de restitución normal, Rt: coeficiente de restitución tangencial,  $\phi$ : ángulo de rozamiento y Std: desviación estándar.

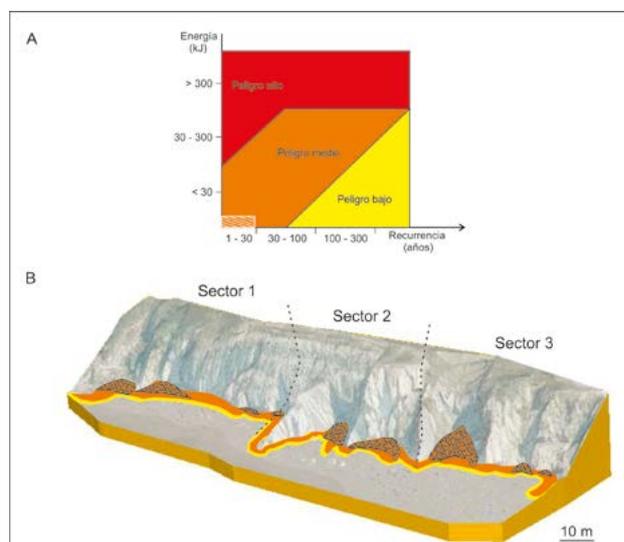
### Propuesta de actuaciones

Además de la simulación de trayectorias, la modelización tridimensional permite realizar mapas de distintos parámetros que pueden favorecer la gestión de estos espacios. Para la elaboración de estos mapas, el terreno se divide en celdas de distinto tamaño. En nuestro caso, dado que los acantilados bordean la playa de Atxabiribil y se trata de un área protegida, como se ha indicado previamente, las medidas estructurales no son recomendables. En este punto, resulta fundamental establecer el alcance de los bloques desprendidos y delimitar las zonas activas de caída de rocas, lo que podrá permitir la elaboración de mapas de peligrosidad, con los que orientar la utilización de estos espacios. Con este objetivo, se elaboran los siguientes mapas con celdas de 2x2 metros: número de trayectorias que pasan por cada una de las celdas en que se ha discretizado el terreno (Fig. 9A), energía máxima alcanzada en cada celda (Fig. 9B) y número de impactos de bloques por celda (Fig. 9C). La figura de trayectorias, permite reconocer los recorridos preferenciales de caída de rocas, mientras las de energía máxima y número de impactos informan de la entidad del proceso en distintas áreas del acantilado.

A partir de esta información, la relación entre la energía y la recurrencia del proceso, obtenida mediante el seguimiento plurianual de los desprendimientos, determina la peligrosidad por caída de rocas (Fig. 10A). En el caso de la playa de Atxabiribil, la energía individual de las caídas alcanza máximos de 5 kJ, y la recurrencia observada es de entre 20 y 30 caídas al año en los distintos tramos de la playa, lo que según la clasificación establecida por Volkwein *et al.* (2011) supone un peligro medio. De este modo se realiza un mapa de peligrosidad de la playa en el que se delimitan (Fig. 10B) las zonas activas (desde el talud hasta el alcance máximo) y una zona de seguridad para los usuarios de la playa con un margen de 2 metros, que es el tamaño de celda utilizado. En todo caso, dado que la modelización se ha hecho con observaciones de 3 años de seguimiento, estos márgenes deberán ser contrastados y podrían ser aumentados en la medida en que se disponga de una información más completa del proceso.



**Fig. 9.-** Mapeos por celdas de algunos parámetros de los procesos de caídas de rocas en la playa de Atxabiribil. A) Número de trayectorias. B) Energía. C) Número de impactos.



**Fig. 10.-** A) Clasificación de peligrosidad para caídas de rocas según Volkwein *et al.* (2011) y zona en la que se encuentra la playa de Atxabiribil (recuadro rallado). B) Mapa de gestión recomendada en la playa de Atxabiribil: zona activa (naranja), zona de advertencia (amarilla).

### Discusión y conclusiones

En la playa de Atxabiribil, la aproximación aplicada al análisis de caída de rocas en acantilados costeros permite resaltar el valor de los estudios de detalle para el desarrollo

de propuestas de actuación ajustadas a cada espacio. Para ello, las nuevas herramientas de adquisición de información topográfica, fundamentalmente drones y láser escáner terrestres, facilitan la obtención de modelos digitales del terreno de detalle, de forma rápida y eficiente. De esta forma, se optimiza el trabajo de campo y puede desarrollarse de manera más precisa la localización de áreas fuente, trayectoria y zonas de acumulación de bloques desprendidos. En este estudio, la calidad del macizo rocoso se ha establecido mediante el índice *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski, si bien en futuros trabajos se considera incluir índices específicos para entornos flyschoides, como el GSI (*Geological Strength Index*) de Marinis y Hoek (2001). El trabajo de campo se completa con la identificación de los tipos de rotura en el acantilado, y la determinación del peso, dimensiones y alcance de bloques caídos. A partir de esta información, la modelización tridimensional, en nuestro caso utilizando el programa RocPro3D (RocPro3D, 2014), permite precisar la evolución, trayectoria y energía de los desprendimientos.

En este sentido, a partir de los registros de 3 años de seguimiento se establece que la distribución general de frecuencias de peso de bloques caídos sigue una ley potencial, similar a la obtenida de inventarios de caída de rocas recogidos en trabajos previos (Bunce *et al.*, 1997; Hungr *et al.*, 1999; Dussauge-Peisser *et al.*, 2003; Volkwein *et al.*, 2011; Morales *et al.*, 2021), con un valor de bloque máximo de 30 kilogramos. Este valor es utilizado como base para el desarrollo de mapas de peligrosidad, considerando el máximo alcance de los bloques desprendidos y su recurrencia.

Estos resultados posibilitan el desarrollo de estrategias de gestión específicas adaptadas al entorno investigado. En el caso de la playa de Atxabiribil, al tratarse de un espacio protegido donde el acantilado se sitúa directamente sobre la playa, se propone la delimitación de zonas de advertencia. Este tipo de aproximación, basada en el principio de actuación mínima, requiere un proceso de seguimiento, tanto para profundizar en las dinámicas de detalle del entorno, como para verificar las actuaciones planteadas a corto, medio y largo plazo (Morales *et al.*, 2018). En este sentido, en lo que se refiere al análisis de detalle de las dinámicas de caída de rocas, se trabaja en el reconocimiento de posibles relaciones entre las características geomecánicas del macizo rocoso y el desarrollo y evolución de los desprendimientos. Del mismo modo, a medida que se continúe la investigación, se irá recogiendo más información sobre las dimensiones y alcance de los bloques caídos, lo que permitirá validar, o en su caso modificar, los resultados obtenidos. En todo caso, la información recogida permite tener una imagen tridimensional de la situación actual del entorno.

### Agradecimientos y financiación

Los autores quieren agradecer a los dos revisores, Dra. Mercedes Ferrer y Dr. Javier Elorza, las correcciones y sugerencias realizadas del manuscrito, que han ayudado notablemente a la mejora del presente trabajo. Del mis-

mo modo, agradecer a la editora de la revista Dra. Nieves López-González por su dirección a lo largo de todo el proceso. El presente estudio ha sido financiado por el grupo de investigación de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) IT-1029/16 (Gobierno Vasco) en el marco del proyecto estratégico “Análisis de inestabilidades en entornos costeros del País Vasco” PES-18/97 (Universidad del País Vasco).

### Contribución de autores

Elaboración del trabajo, J.A.C. y T.M.; metodología, J.A.C., T.M. y J.A.U.; obtención de datos, J.A.C., T.M., A.A. y J.A.U.; figuras, J.A.C. y J.A.U.; investigación/análisis, J.A.C., T.M., A.A. y J.A.U.; revisión del manuscrito, T.M. y J.A.U.

### Referencias

- Alejano, L.R., Gómez-Márquez, I., Martínez-Alegría, R., 2010. Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology*, 114: 93-104.
- Álvarez-Llano, I., Baguer, A., Martínez López de Sabando, M., Mugica, J., Pérez-García, J.R., Unanue, L., Elorza, J., 2006. Variaciones de espesor y de contenido en CaCO<sub>3</sub> en los pares marga-caliza del Maastrichtiense inferior en Sopelana (Arco Vasco). *Geogaceta*, 39: 131-134.
- Apellániz, E., Lamolda, M.A., Orue-Etxebarria, X., 1983. Posición estratigráfica de las “Calizas del Danés”, País Vasco. *Revista Especial de Micropaleontología*, 15(3): 447-455.
- Batenburg, S.J., Gale, A.S., Sprovieri, M., Hilgen, F.J., Thibault, N., Boussaha, M., Orue-Etxebarria, X., 2014. An astronomical time scale for the Maastrichtian based on the Zumaia and Sopelana sections (Basque Country, northern Spain). *Journal of the Geological Society, London*, 171: 165-180.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. United States, 272 p.
- Bunce, C.M., Cruden, D.M., Morgenstern, N.R., 1997. Assessment of the hazard from rock fall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal*, 34: 344-356.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patto, F.D., Cording, E.J., 1967. Design of surface and near surface construction in rock. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics-Failure and Breakage of Rock*. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, 237-302.
- Dinarès-Turell, J., Pujalte, V., Stoykova, K., Elorza, J., 2013. Detailed correlation and astronomical forcing within the Upper Maastrichtian succession in the Basque Basin. *Boletín Geológico y Minero*, 124: 253-282.
- Dong, Z., Liang, F., Yang, B., Xu, Y., Zang, Y., Li, J., Wang, Y., Dai, W., Fan, H., Hyyppä, J., Stilla, U., 2020. Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS*

- Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163: 327-342.
- Dussauge-Peisser, C., Grasso, C., Helmstetter, A., 2003. A statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108: 1-11.
- Emery, K.O., Kuhn, G.G., 1982. Sea cliffs, their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin*, 93: 644-654.
- Fan, L., Smethurst, J.A., Atkinson, P.M., Powrie, W., 2015. Error in target-based georeferencing and registration in terrestrial laser scanning. *Computers & Geosciences*, 83: 54-64.
- Feuillé, P., Rat, P., 1971. Structures et paléogéographies pyrénéo-cantabriques. En : *Histoire structural du Golfe de Gascogne, Tome 2*, (J. Debysier, X. Le Pichon, L. Montardet, Eds.). Publication de l'Institut Français du Pétrole, Collection et Séminaires, Technip, Paris, 1-48.
- Hungr, O., Evans, S., Hazzard, J., 1999. Magnitude and frequency of rockfalls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 224-238.
- Iridoy, P., Zudaire, S., Azaguirre, M., Dorronsoro, A., Olano, G., Beriain, E., Usarbarrena, A., Elorza, J., 2010. Variaciones de color y contenido de CaCO<sub>3</sub> en los pares marga-caliza del Maastrichtiense superior y Eoceno inferior en Sopelana (Arco Vasco): reflejo de cambios paleoambientales. *Geogaceta*, 49: 91-94.
- Lamolda, M.A., Orue-Etxebarria, X., Proto-decima, F., 1983. The Cretaceous-Tertiary boundary in Sopelana Biscay, Basque Country). *Zitteliana*, 10: 663-670.
- Li, X., Dong, M., Jiang, D., Li, S., Shang, Y., 2020. The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision. *Powder Technology*, 362: 17-25.
- Margottini, C., Spizzichino, D., 2014. The management of cultural heritage in sites prone to natural hazard. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*. XCVI: 415-430.
- Margottini, C., Gigli, G., Ruther, H., Spizzichino, D., 2016. Advances in sustainable conservation practices in rupestrian settlements inscribed in the UNESCO's World Heritage List. *Procedia Earth Planet Science*, 16: 52-60.
- Marinos, P., Hoek, E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60: 85-92.
- Matos Fernandes, M., 2020. *Analysis and Design of Geotechnical Structures*. CRC Press. 754 p.
- Morales, T., Uriarte, J.A., Damas, L., Antigüedad, I., 2018. Taludes inestables y patrimonio cultural: cómo y hasta dónde actuar. Una visión desde las Galerías Punta Begoña (Getxo, Bizkaia). *VI. Congreso GEIIC*, Vitoria-Gasteiz.
- Morales, T., Clemente, J.A., Damas Mollá, L., Izagirre, E., Uriarte, J.A., 2021. Analysis of instabilities in the Basque Coast Geopark coastal cliffs for its environmentally friendly management (Basque-Cantabrian basin, northern Spain). *Engineering Geology*, 283: 106023.
- Pandzic, J., Pejic, M., Bozic, B., Eric, V., 2017. Error model of direct georeferencing procedure of terrestrial laser scanning. *Automation in Construction*, 78: 13-23.
- Pfeiffer, T.J., Bowen, T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 26, 135-146.
- Pujalte, V., Baceta, J.I., Orue-Etxebarria, X., Payros, A., 1998. Paleocene strata of the Basque Country, western Pyrenees, northern Spain: Facies and sequence development in a deep-water starved basin. En: *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins: SEPM* (P.C. Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin, P.R. Vail, Eds.). Society for Sedimentary Geology, 60: 311-325.
- QGIS 3.8: Zanzibar, 2019. <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html> (08/12/2021).
- Ramírez del Pozo, J., 1973. Síntesis geológica de la provincia de Álava. *Obra cultural de la Caja de ahorros de la Ciudad de Vitoria*, Vitoria-Gasteiz.
- RocPro3D, 2014. RocPro3D software. [http://www.rocpro3d.com/rocpro3d\\_en.php](http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php) (08/12/2021).
- RocScience, 2013. Dips, analyze orientation-based geological data. Rocscience's User's Guide. <https://www.rocscience.com/software/dips> (08/12/2021).
- Rodríguez, L., Esteban, J.J., Vegas, N., Cuevas, J., 2008. Tectónica de inversión en la Playa de Sopelana (Arco Vasco, Pirineos occidentales). *Geogaceta*, 45: 23-26.
- Spizzichino, D., Condori Amaru, J., Gallego Revilla, J.I., Lombardi, L., Fernandez Merodo, J.A., Margottini, C., 2019. Hydro Geological hazard and mitigation measures for the conservation of Akapana Pyramid in the Tiwanaku archaeological site (Bolivia). En: *Monitoraggio e Manutenzione nelle Aree Archeologiche. Cambiamenti climatici - Dissesto idrogeologico - Degrado chimico ambientale*. Roma, 265-268.
- Tonmoy, F.N., Wainright, D., Verdon-Kidd, D.C., Rissik, D., 2018. An investigation of coastal climate change risk assessment practice in Australia. *Environmental Science and Policy*, 80: 9-20.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall Characterisation and structural protection- A review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 2617-2651.
- Young, A.P., Carilli, J.E., 2019. Global distribution of coastal cliffs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44: 1309-1316.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 16-09-2021

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 29-11-2021

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 09-12-2021