



Universidad de Oviedo



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL ACANTILADO EN LA SENDA COSTERA DEL CABO BUSTO (NO ESPAÑA)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA

Autor: Pablo Álvarez Blanco

Tutora: María José Domínguez Cuesta

Cotutor: Carlos López Fernández

Julio 2023

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	5
1.1. Zona de estudio.....	7
1.2. Contexto geológico.....	8
1.3. Entorno geomorfológico.....	10
2. METODOLOGÍA	11
2.1. Recopilación de información	11
2.2. Fotointerpretación.....	11
2.3. Trabajo de campo	11
2.4. Cartografía geomorfológica.....	17
2.5. Elaboración de modelos digitales del terreno.....	19
2.6. Perfiles transversales de acantilados.....	19
2.7. Modelización de caída de rocas en la playa de Bozo	20
2.8. Zonificación de la senda costera.....	21
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.1. Orografía de la zona de estudio	24
3.2. Cartografía actual	28
3.3. Cartografía histórica	33
3.4. Estudio de estaciones geomecánicas y clasificaciones geomecánicas	37
3.5. Modelización de caída de rocas en la playa de Bozo	42
3.5.1. Perfil 1.....	43
3.5.2. Perfil 2.....	45
3.6. Zonificación de la senda costera.....	48
4. CONCLUSIONES	50
5. REFERENCIAS	52
ANEXOS	57
Anexo 1. Datos de la estación geomecánica 1.....	57
Anexo 2. RMR en la estación geomecánica 1	59
Anexo 3. Datos de la estación geomecánica 2.....	60

Anexo 4. RMR en la estación geomecánica 2	62
Anexo 5. Datos de la estación geomecánica 3.....	63
Anexo 6. RMR en la estación geomecánica 3	65
Anexo 7. Datos de la estación geomecánica 4.....	66
Anexo 8. RMR en la estación geomecánica 4	68
Anexo 9. Tablas de estimación de los parámetros RQD, Jn,Jr, Ja, O factor, Jw y SRF usados en la fórmula Q-slope	69
Anexo 10. Clasificación SMR para taludes (Romana, 1997).....	70
Anexo 11. Roturas probables y métodos de soporte sugeridos para valores SMR (Romana, 1997).....	71
Anexo 12. Cartografía de cicatrices, año 2022.....	72
Anexo 13. Cartografía de grietas, año 2022	73
Anexo 14. Cartografía de depósitos de gravedad, año 2022	74
Anexo 15. Zonas de evidencia, año 2022	75
Anexo 16. Límite superior del acantilado, año 2022.....	76
Anexo 17. Valles colgados	77
Anexo 18. Cartografía de vegetación en la zona de estudio.....	78

RESUMEN

La costa acantilada de Cabo Busto (municipio de Valdés, Asturias) presenta indicios de procesos de inestabilidad de ladera que podrían afectar a un tramo de 1,63 km de la senda costera PR-AS4, el cual discurre en amplias zonas por el borde superior del acantilado. En este trabajo se ha realizado un estudio geomorfológico y geotécnico de la zona con el objetivo de conocer y caracterizar la potencial afección de los procesos de gravedad al trazado de la senda. Para ello, se ha abordado la i) cartografía geomorfológica secuencial, analizando la evolución temporal de la zona mediante ortofotografías de los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017, 2020 y 2022 ii) caracterización geomecánica del macizo rocoso, iii) modelización de caídas de rocas en zonas concretas del acantilado y iv) cartografía de susceptibilidad por procesos de inestabilidad en el acantilado y la senda.

Los resultados obtenidos muestran que en los acantilados de Cabo Busto predominan las caídas de rocas, siendo las zonas más susceptibles las que se encuentra a altitudes superiores a 60 m, presentan pendientes entre 45°-90° y preferiblemente en acantilados orientados al suroeste, con vegetación halófila o escasa. Estos movimientos en masa están favorecidos por la incidencia del oleaje procedente del Noroeste y la distribución de hasta cuatro familias de discontinuidades. Las roturas que se generan son en cuña y/o vuelco en el acantilado de playa de Bozo, por vuelco en el acantilado pizarroso del mirador del faro, y podrían darse tanto roturas planares, en cuña o por vuelco en el sector oriental del cabo. La clasificación geomecánica del macizo rocoso muestra una calidad aceptable, según el RMR, y una valoración buena, para los acantilados de la playa de Bozo, y normal para el resto de los acantilados estudiados, en cuanto a la clasificación SMR. A su vez, el método Q-slope valora que existen taludes inestables en la playa de Bozo y en el mirador del faro. La modelización de trayectorias que simula los bloques desprendidos en la playa de Bozo ha permitido conocer que esta zona es potencialmente peligrosa por impactos de cuñas desprendidas.

Se desarrolló un mapa de susceptibilidad de caída de rocas, siendo en sectores de los acantilados con altitudes superiores a 60 m, pendientes de 60°-90° y preferiblemente en acantilados orientados al suroeste, con vegetación halófila o escasa, donde es más probable su desarrollo. Teniendo en cuenta esto, el trazado de senda costera próximo al acantilado presenta susceptibilidad media y alta.

ABSTRACT

The steep coast of Cabo Busto (municipality of Valdés, Asturias) shows signs of slope instability processes that could affect a 1.63 km section of the coastal path PR-AS4, which runs in large areas along the upper edge of the cliff. In this work, a geomorphological and geotechnical study of the area has been carried out with the aim of knowing and characterizing the potential effect of gravity processes on the route of the path. To this end, i) sequential geomorphological cartography has been addressed, analyzing the temporal evolution of the area through orthophotographs from the years 2006, 2009, 2011, 2014, 2017, 2020 and 2022 ii) geomechanical characterization of the rocky massif, iii) modeling of rock falls in specific areas of the cliff and iv) cartography of susceptibility due to instability processes on the cliff and the path.

The results obtained show that rockfalls predominate in the Cabo Busto cliffs, with the most susceptible areas being those found at altitudes higher than 60 m, with slopes between 45°-90° and preferably on southwest-facing cliffs, with halophytic vegetation or limited. These mass movements are favored by the incidence of waves coming from the Northwest and the distribution of up to four families of discontinuities. The breaks that are generated are wedge and/or overturning on the Bozo beach cliff, due to overturning on the slate cliff of the lighthouse viewpoint, and both planar, wedge and overturning breaks could occur in the eastern sector of the cape. The geomechanical classification of the rock mass shows an acceptable quality, according to the RMR, and a good assessment, for the cliffs of Bozo beach, and normal for the rest of the cliffs studied, in terms of the SMR classification. In turn, the method Q-slope assesses that there are unstable slopes on Bozo beach and at the lighthouse viewpoint. The modeling of trajectories that simulates the detached blocks on the Bozo beach has revealed that this area is potentially dangerous due to the impact of detached wedges.

A rockfall susceptibility map was developed, being in sectors of the cliffs with altitudes higher than 60 m, slopes of 60°-90° and preferably in southwest-facing cliffs, with halophytic or sparse vegetation, where its development is more likely. Taking this into account, the route of the coastal path close to the cliff presents medium and high susceptibility.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El 80% de las costas del mundo se clasifican como rocosas, siendo aproximadamente el 37% costas acantiladas atlánticas del continente europeo (Young y Carilli, 2019). Aún siendo un tipo de costa abundante, no han sido tan estudiadas como otras tipologías, debido, probablemente, a la aparente estabilidad, evolución más lenta o al menor interés turístico (Flor-Blanco *et al.*, 2022).

La costa cantábrica (Norte de la Península Ibérica), de 800 km de longitud y una alineación general E-O, es un ejemplo de este tipo de costas. Perteneciente a ésta, la costa asturiana se extiende a lo largo de 390 km entre 43°52' y 42°45'N de latitud y 4°21' y 7°24'O de longitud, constituyendo en torno al 25% de la misma. Se trata de una costa marcadamente rocosa y acantilada, con numerosos entrantes y salientes, en la que son frecuentes los movimientos en masa de distintas tipologías y dimensiones (Flor Rodríguez *et al.*, 2014; Valenzuela *et al.*, 2017; Domínguez-Cuesta *et al.*, 2022). Así, durante el período 1980-2016 se han registrado en la base de datos de argayos del Principado de Asturias (BAPA) 2.245 inestabilidades, 224 de las cuales se produjeron en áreas costeras acantiladas (Valenzuela *et al.*, 2017; Domínguez-Cuesta *et al.*, 2019). La orografía litoral, junto con la presencia de un clima húmedo y la incidencia de oleajes superiores a 4 m alrededor de 40 días al año, provoca que la actividad geomorfológica por fenómenos de gravedad en acantilados sea importante, favoreciendo el retroceso costero que, en algunas zonas, ha alcanzado valores entre 1,2 y 2,2 m/año (Domínguez-Cuesta *et al.*, 2020).

El clima en Asturias es oceánico, con precipitaciones durante todo el año y con temperaturas moderadas especialmente en la costa (García Couto, 2011). Según la Agencia Estatal de Meteorología la precipitación media anual oscila en torno a los 1200 mm, mientras que la temperatura media anual es de 14° C, teniendo un valor mínimo medio de 9,6° C y máximo medio de 18° C, registrándose las temperaturas máximas en los meses de verano y las mínimas en enero.

Los vientos que afectan al litoral asturiano son multidireccionales y estacionales, teniendo una dirección predominante del NE en verano y SO en invierno. Los oleajes dominantes en el mar Cantábrico provienen del NO al NE, con alturas significantes superiores a 1,7 m. La máxima altura, desde los primeros registros en 1998, ha sido de 12,18 m (Flor Rodríguez *et al.*, 2014). Así, la incidencia del oleaje en la zona de Luarca presenta una dirección NO al igual que los posibles temporales marítimos que se puedan dar en la región, pudiendo tener altas magnitudes (Alonso Alonso, 2020). Las mareas son semidiurnas y los rangos medios se encuentran en la categoría mesomareal, con mínimos de 1,0 m y máximos de 4,95 m, en Gijón (Flor Rodríguez *et al.*, 2014).

La ocupación de la costa asturiana se basa en el uso residencial y agrícola, teniendo poblaciones que se distribuyen a lo largo del litoral tanto en pequeños como grandes núcleos

demográficos, predominando los primeros, mientras que el territorio no residencial se reserva para actividad agrícola y ganadera. La geología ha determinado las zonas de asentamiento y las formas de vida. De este modo, la población se concentra mayoritariamente en las zonas planas de rasa que, junto con los entornos fluviales, ofrecen las mejores posibilidades de habitabilidad y desarrollo. A su vez, los abrigos naturales de la costa han dado lugar a las principales poblaciones relacionadas con la pesca y el comercio marítimo y en las que actualmente tiene lugar la mayor parte de la actividad industrial y terciaria (Farias Arquer *et al.*, 2008).

Estas evidencias de poblamiento se ven representadas en el patrimonio arqueológico, siendo destacable, incluyendo numerosos yacimientos arqueológicos repartidos por la región. En la zona costera se agrupan parte de ellos, pudiendo encontrar evidencias de tiempos paleolíticos, siendo el caso del yacimiento de Cabo Busto o Vallinas, teniendo también grandes ejemplos de arte rupestre en la Cueva de Tito Bustillo, Cueva del Pindal o en la Cueva de Ardines, entre otros. También, se pueden visitar poblados fortificados (castros), teniendo catalogados más de trescientos yacimientos en todo el territorio (Camino Mayor, 1995; Gobierno del Principado de Asturias, s.f.; Principado de Asturias, s.f.).

Asturias es una región en la que un 20% de su superficie se encuentra incluida en distintas figuras de protección de la Red Regional de Espacios Naturales Protegidos u otras figuras de ámbito nacional e internacional, siendo un reclamo turístico. Las figuras de protección costera incluyen parques naturales, reservas de la biosfera, reservas naturales, paisajes protegidos y monumentos naturales. Otras figuras de protección integradas dentro de la Red Natura 2000 son los Lugares de Interés Comunitario (LIC), las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y las Zonas Especiales de Conservación (ZEC).

Todo lo anterior hace del litoral asturiano una zona de alto atractivo turístico. Así, la creación de rutas o sendas costeras favorece el tránsito de personas para el disfrute de los recursos naturales del entorno por el que transcurren. Teniendo en cuenta que estas sendas costeras transcurren muchas veces al borde de las zonas acantiladas rocosas, es preciso valorar su peligrosidad natural, con el objetivo de minimizar el riesgo debido a las frecuentes inestabilidades que se dan en los acantilados cercanos y que pueden afectar, tanto a las propias rutas, como a los transeúntes. Para ello se deben afrontar los pertinentes estudios geológicos.

Este trabajo se ha centrado en la senda costera de Cabo Busto (PR-AS4 en Asturias, NO de España). Todo el entorno constituye un área de gran valor paisajístico y turístico. La playa de Bozo, de fácil acceso desde la senda y con evidencias de desprendimientos, es el segundo lugar más visitado después del faro (Arruñada, 2020).

El objetivo general de este trabajo ha sido analizar la estabilidad general del acantilado por el que transcurre la senda costera de Cabo Busto.

Para conseguir este objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar geomorfológicamente el entorno de la senda costera.
- Identificar y caracterizar los procesos de gravedad que afecten a la zona.
- Modelizar la caída de rocas en la playa de Bozo.
- Establecer una zonificación de la susceptibilidad de la senda costera.

1.1. Zona de estudio

La senda costera de Cabo Busto PR-AS4 (Fig. 1), situada en la costa occidental asturiana, concretamente en el municipio de Valdés, presenta un recorrido total de 9,7 km (Federación de Deportes de Montaña, Escalada y Senderismo del Principado de Asturias [FEMPA], s.f.), discurriendo a través de terrenos agrícolas, pinares, robledales y bosques de ribera. Su principal atractivo turístico es la vista panorámica que permite sobre los acantilados de la zona, con alturas que llegan a superar los 60 m. En el entorno más próximo al Cabo Busto, la senda presenta una longitud de 1,63 km discurriendo en varios tramos muy próxima al borde superior de los acantilados, siendo la sección donde se ha centrado el estudio. En su recorrido, se encuentran seis miradores, pudiendo disfrutar desde ellos de vistas hacia el Mar Cantábrico, así como hacia cabo Vidio, al oriente, y hacia Luarca, al occidente. Además, en varios puntos a lo largo del recorrido se puede acceder a distintas playas como la de Cueva, Bozo, Vallino, etc. (Fig.1) (Turismo Asturias, s.f.).

Las particularidades del paisaje, junto con los factores climáticos y la biodiversidad, han hecho que el entorno de Cabo Busto haya sido incluido, desde 2014, dentro de las Zonas ZEC y de las Zonas ZEPA de la franja costera Cabo Busto-Luanco, ambas figuras propias de la red europea de espacios protegidos Red Natura 2000. Además, desde 2004 está propuesto como Lugar LIC (Naturaleza de Asturias, s.f.).

Desde el punto de vista arqueológico, es un lugar de gran interés debido a la presencia de yacimientos de herramientas líticas de *Homo Neanderthalensis*. El análisis de lascas ha permitido constatar que en Cabo Busto hubo un asentamiento permanente de estos homínidos (Asensio, 1995). La presencia de testigos líticos pertenecientes al *Homo Heidelbergensis*, puesta de manifiesto por Fonseca (2013), demostró que en Cabo Busto se localiza el asentamiento más antiguo de la costa cantábrica, hace más de 400.000 años, siendo hasta la fecha el posible primer poblador de ella.

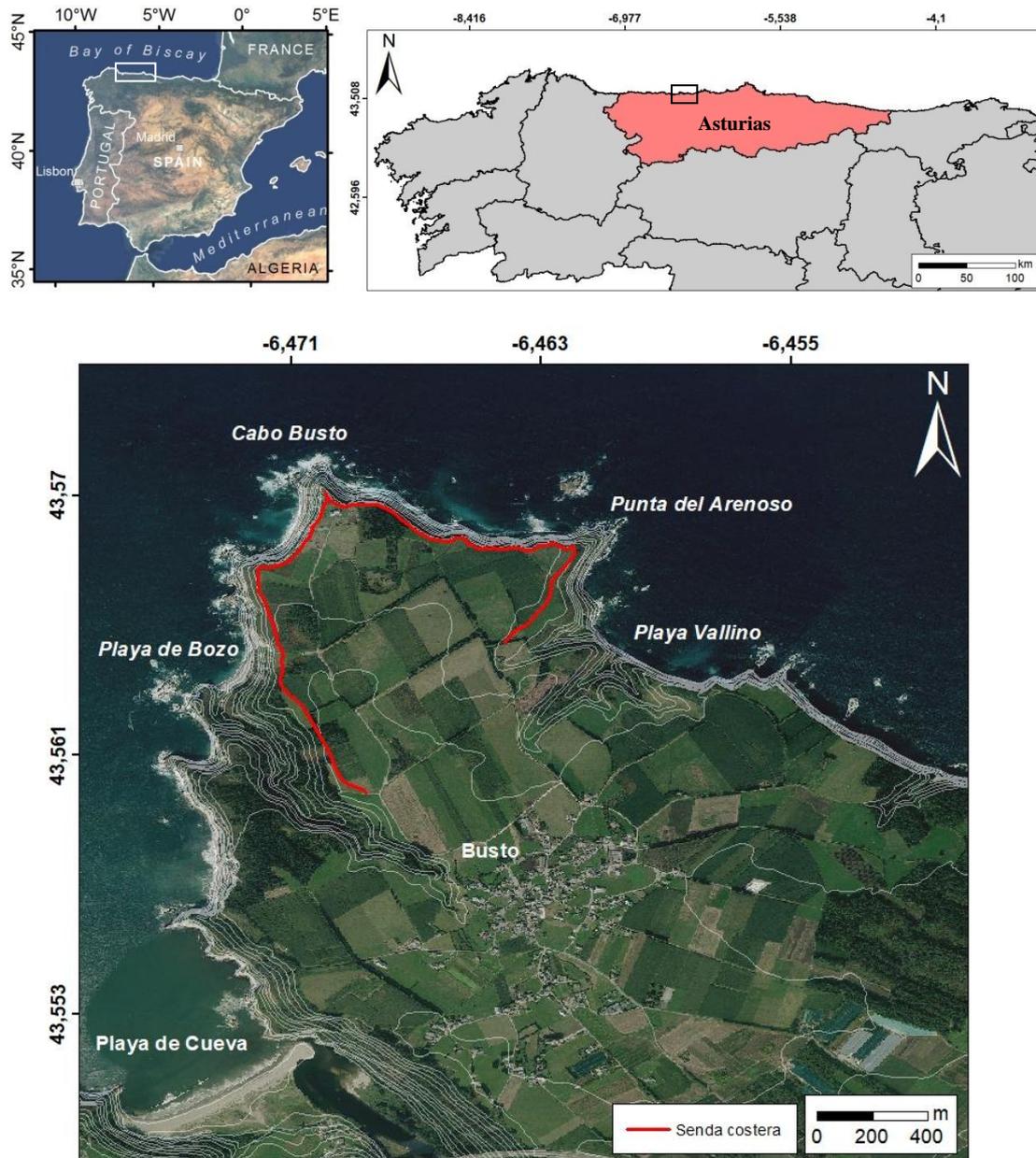


Figura 1. Situación del tramo de senda costera estudiado en Cabo Busto (OrtoPNOA 2022 CC-BY 4.0 scne.es, BTN CC-BY 4.0 scne.es y fuentes de datos) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

1.2. Contexto geológico

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra en la Zona Astur-occidental Leonesa (ZAOL) del Macizo Varisco (Lotze, 1945; Julivert *et al.*, 1972, Farias *et al.*, 1987). El sustrato de esta zona se compone por rocas siliciclásticas del Paleozoico Inferior, cuyo espesor supera los 10.000 m, predominando las alternancias de pizarras, areniscas y cuarcitas (Farias Arquer *et al.*, 2008).

En el entorno de Cabo Busto afloran las cuarcitas y pizarras de la Serie de los Cabos, de edad Cámbrico Medio-Superior a Ordovícico Inferior, estando el sustrato afectado principalmente por numerosas fallas menores con dirección NO-SE (Fig. 2).

La actual configuración geológica del área de estudio se debe a una compleja evolución geológica de la zona occidental asturiana, estando las pizarras, areniscas y cuarcitas afectadas por una compleja estructura tectónica. El rasgo geomorfológico más destacado es la presencia de una superficie de rasa, antigua plataforma de abrasión marina emergida de morfología actual plana (Flor y Flor-Blanco, 2014), dando lugar a un característico paisaje natural.

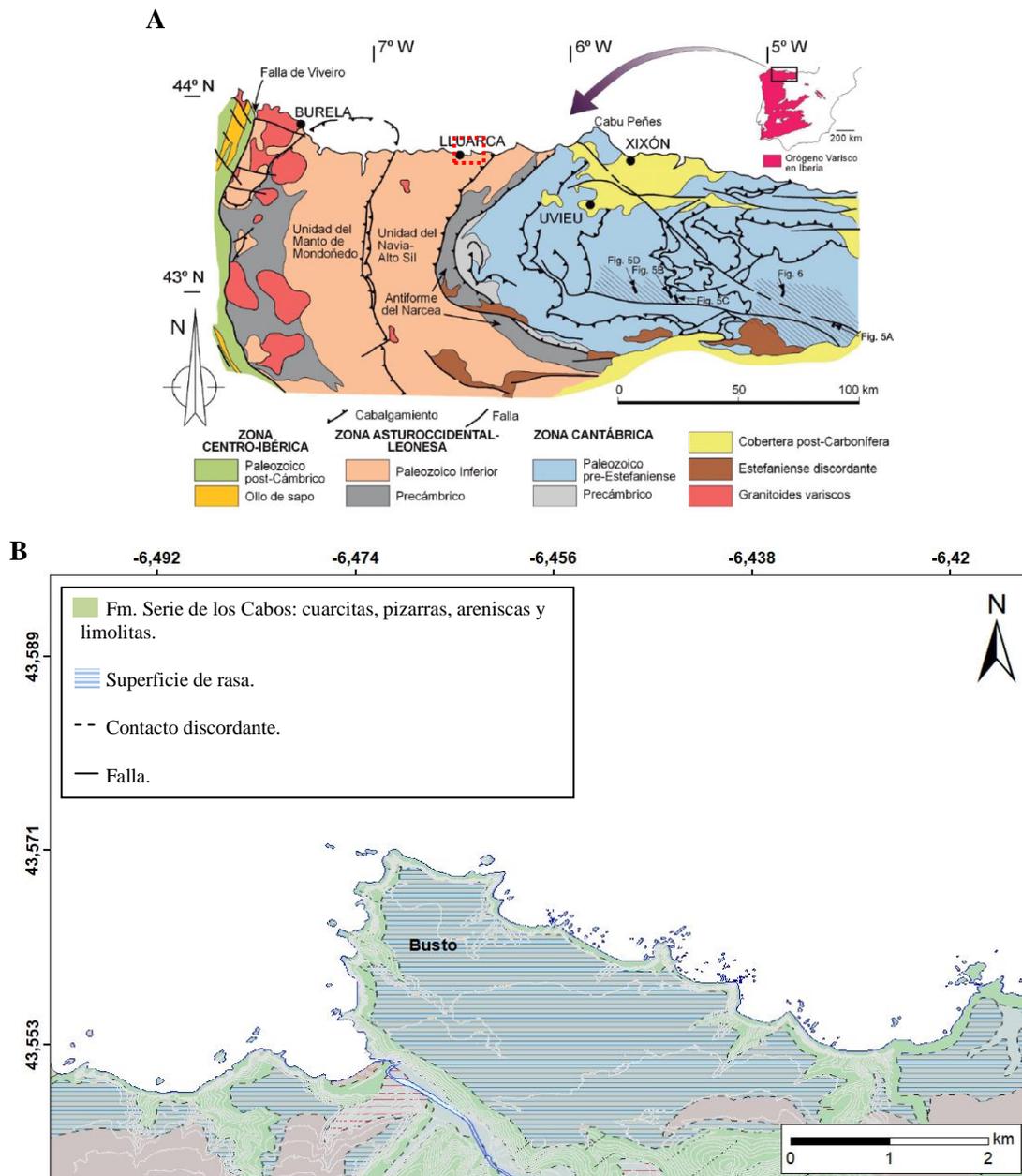


Figura 2. A. Esquema simplificado de las unidades geológicas presentes en Asturias (Bastida *et al.*, 2016). B. Contexto geológico regional de Cabo Busto (González Menéndez *et al.*, 2008) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

1.3. Entorno geomorfológico

Las litologías descritas anteriormente se ven afectadas por la acción de distintos agentes geomorfológicos, que han modelado el paisaje que actualmente se observa. Así, los niveles cuarcíticos y de areniscas han dado lugar a la aparición de cabos con prominentes acantilados que, en Cabo Busto, alcanzan los 63 metros de altitud. Por el contrario, las pizarras, menos resistentes, han permitido el encajamiento de cauces fluviales y propiciado la aparición de ensenadas con calas y playas (Farias Arquer *et al.*, 2008).

Un rasgo geomorfológico destacable de la zona de estudio es la presencia de una rasa costera (Álvarez-Marrón *et al.*, 2008; López-Fernández *et al.*, 2020). En términos generales, son superficies planas de erosión, correspondiendo a antiguas plataformas de abrasión marina emergidas, cuya formación se atribuye a cambios eustáticos relacionados con levantamientos tectónicos en el Cenozoico (Flor y Flor-Blanco, 2014). Estas superficies planas se sitúan entre los acantilados y las áreas montañosas del interior, con pendientes suaves, entre 0,15° y 0,40°, conservándose extraordinariamente en materiales cuarcíticos y areniscosos, siendo el caso de la zona de estudio. Se distribuyen escalonadamente en varias alturas y número variable, encontrándose en las costas de Cantabria, Asturias y País Vasco (Flor, 1983; Mary, 1983). Esta rasa se encuentra representada en el registro geológico por depósitos, discordantes a la Serie de los Cabos, compuestos por arenas y cantos marinos (Marcos *et al.*, 1976). Sin embargo, Flor y Flor-Blanco (2014), en estudios más recientes, afirman que en la costa occidental asturiana las superficies de rasa están cubiertas por depósitos continentales, no marinos.

Así, la rasa situada en Cabo Busto pertenecería a los aplanamientos de Asturias occidental y de Galicia, una amplia superficie plana que se extiende desde Artedo hasta Burela (Lugo), con una anchura máxima de 5 km y una altura de 105 m, aproximadamente (IGME, 1985; Álvarez-Marrón *et al.*, 2008; López-Fernández *et al.*, 2020).

2. METODOLOGÍA

Este trabajo ha supuesto la realización de una serie de tareas que se describen a continuación.

2.1. Recopilación de información

En una primera fase se realizó una búsqueda y recopilación bibliográfica relativa a la geología y geomorfología de la zona, estudios de dinámica costera y de acantilados, así como de procesos de gravedad. Además, se recopilaron las bases cartográficas temáticas y fotográficas, topografías y ficheros LiDAR a través del centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), del servidor del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y del Sistema de Información Territorial del Principado de Asturias (SITPA-IDEAS). Para la zona de Cabo Busto se dispone del mapa LiDAR (2º Cobertura) del año 2020, con resolución 1 punto/m², las ortofotografías de los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2020, realizados por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con una resolución de 0,25 m y el mapa geológico continuo de España a escala 1:50.000.

2.2. Fotointerpretación

Para poder identificar los procesos de gravedad que afectan a los acantilados de Cabo Busto, determinar su evolución y distinguir sus morfologías y comportamientos, se llevó a cabo una fotointerpretación secuencial. Para ello, se utilizaron las ortoimágenes del PNOA de los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2020, en el sistema de coordenadas UTM datum ETRS89, huso 29 Norte, con una resolución de 0,25 m.

Otras herramientas utilizadas fueron *Google Earth* y el servidor *Iberpix* del Instituto Geográfico Nacional (IGN), estando también disponibles las ortofotos de los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2020, que permitieron visualizar zonas inaccesibles en el campo.

2.3. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en la elaboración de una cartografía geomorfológica del trazado de 1,63 km de senda costera que circula próxima a los acantilados del cabo, incluyendo la playa de Bozo (Fig. 3).

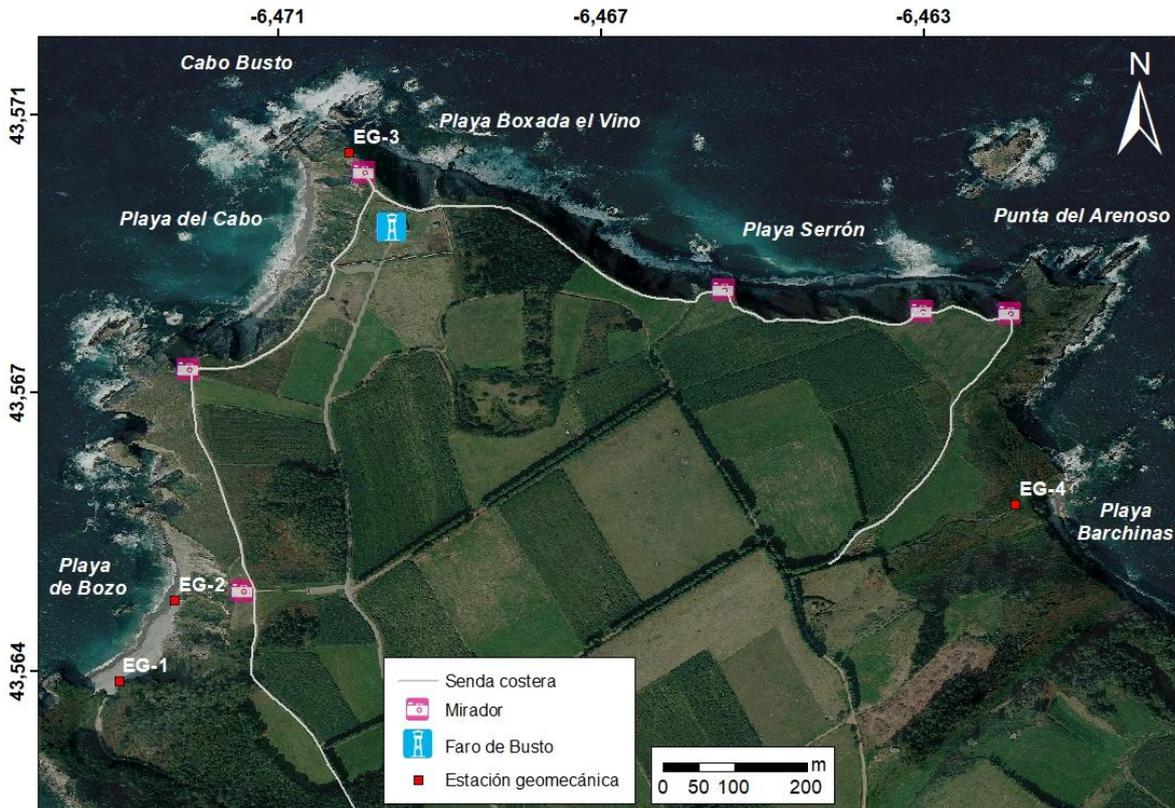


Figura 3. Tramo de senda costera PR-AS4 estudiado, principales elementos turísticos y ubicación de las estaciones geomecánicas realizadas, sobre la ortofotografía del PNOA, año 2022 (OrtoPNOA 2022 CC-BY 4.0 scene.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

También se llevó a cabo el levantamiento de cuatro estaciones geomecánicas (Fig. 3), dos en la playa de Bozo, otra cerca del faro y la cuarta en el extremo oriental de la zona de estudio. Sus ubicaciones fueron escogidas en función de su accesibilidad y la presencia de inestabilidades. Además, se tuvieron en cuenta las áreas con mayor afluencia turística.

En cada estación se tomaron datos litológicos y estructurales del macizo rocoso con el objetivo de valorar el comportamiento del acantilado y de identificar los diferentes tipos de inestabilidades susceptibles de generarse en el mismo. Para cada estación se cumplimentó un estadillo (Anexos 1, 3, 5 y 7) que recoge:

(i) información general de la estación, coordenadas, litología y formación del sustrato, estructuras, observaciones y fotografías.

(ii) datos sobre la roca matriz; fracturación del macizo o descripción del tamaño de bloque en función del número de discontinuidades (ISRM, 1981), grado de meteorización (ISRM, 1981), hidrogeología, resistencia mecánica de la matriz según índices de campo y resistencia mecánica mediante un martillo Schmidt o esclerómetro tipo N.

Con este ensayo in situ, se determina la resistencia al rebote de la roca, tomando 10 lecturas y descartando las que difieran más de 7 unidades del promedio, para después

promediar las restantes (normativa ASTM), dando lugar a un valor medio. Debido a que este resultado fue obtenido con un esclerómetro tipo N, y para poder correlacionarlo con la resistencia a la compresión simple (MPa) se necesita un valor tomado con un esclerómetro tipo L, se utilizó la correlación empírica entre ambos martillos, desarrollada por Ayday y Göktan (1992):

$$R_N = 7.124 + 1.249 R_L \quad (1)$$

siendo R_N y R_L el valor de resistencia al rebote proporcionado por un martillo tipo N y L, respectivamente.

Además, para conocer la resistencia a la compresión simple, se tienen en cuenta la orientación del martillo y la densidad de la roca, siendo para cuarcitas y pizarras, 25,39 kN/m³ y 25,10 kN/m³, respectivamente (Plata Torres, 2009).

Una vez realizado se introducen los datos en el gráfico de correlación (Fig. 4), pudiendo determinar la resistencia a la compresión simple de la roca situada en el afloramiento de la estación geomecánica.

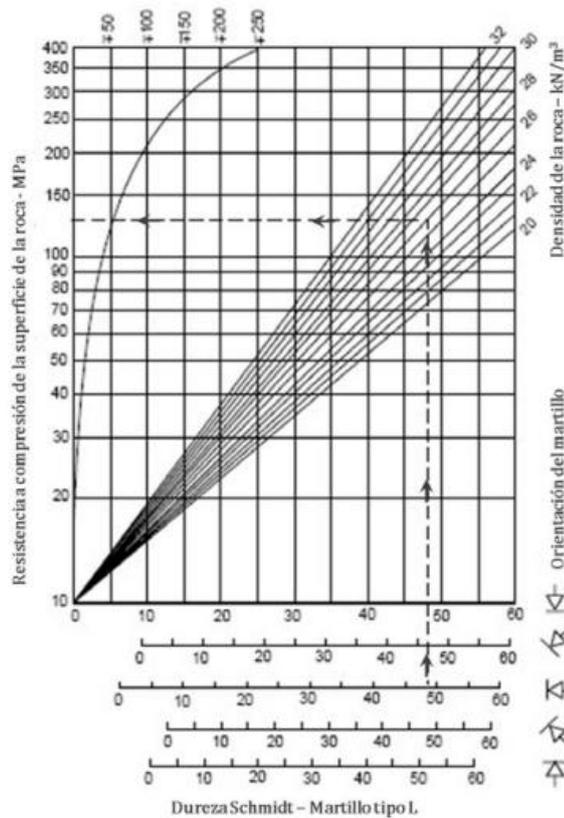


Figura 4. Gráfico de correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión, densidad de la roca y rebote (Miller, 1965).

Por último, se llevó a cabo una (iii) descripción de las discontinuidades (ISRM, 1981), definiendo el tipo de plano medido, orientación (dirección de buzamiento y buzamiento),

espaciado, continuidad, abertura, rugosidad, rellenos, grado de meteorización y filtración de agua. Los datos tomados en las estaciones geomecánicas se analizaron posteriormente con el programa *Dips v8.021 (Rocscience)*, generando una proyección estereográfica con las medidas de cada estación que permite identificar las familias de discontinuidades que afectan al macizo. Este programa permitió asimismo llevar a cabo un análisis cinemático, puramente geométrico, para identificar las potenciales roturas, planares, por vuelco o en cuña (Fig. 5) (Goodman, 1989) que se pueden dar en un talud existente por medio de las familias de discontinuidades existentes. Se considera que se pueden producir roturas planares cuando alguna discontinuidad tiene una dirección similar a la del talud (aproximadamente, hasta 20°) pero buzando menos que éste, además de ser mayor que el ángulo de fricción. En el caso de las roturas en cuña, se ven involucrados en el proceso dos planos de discontinuidades con direcciones oblicuas, que intersectan entre sí, que deben tener una dirección similar al talud y con menor buzamiento, siendo a su vez mayor que el ángulo de fricción. La rotura por vuelco se origina si la discontinuidad se dispone subparalela a la cara del talud (más o menos 30° de diferencia), buzando más que él y que el ángulo de fricción (Markland, 1972).

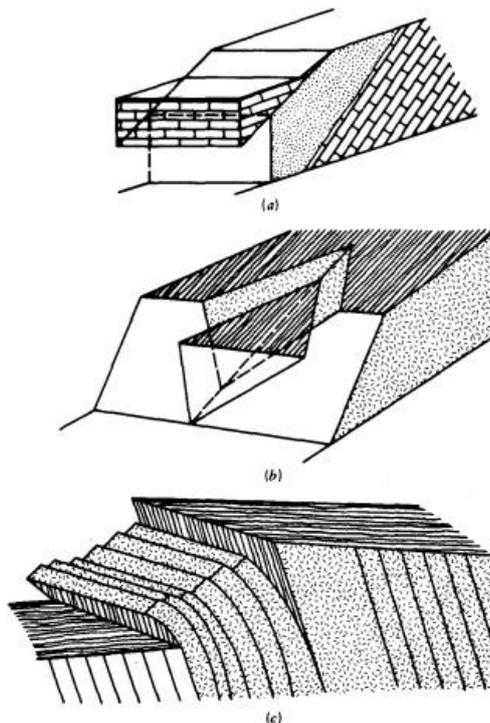


Figura 5. Modelos de rotura en taludes rocosos: a) planar, b) en cuña, c) vuelco (Goodman, 1989).

A continuación, se clasificó el macizo rocoso de acuerdo a su RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989), Q-slope (Bar y Barton, 2017), y SMR (Slope Mass Rating), siendo ésta una modificación específica para taludes del RMR de Romana (1997).

El RMR de Bieniawski se basa en cinco parámetros: resistencia a la compresión de la roca matriz, RQD (hallado indirectamente mediante la fórmula $RQD = 115 - 3,3J_v$), espaciamiento de las discontinuidades, características de las mismas (longitud o continuidad, abertura,

rugosidad, relleno y alteración) y condiciones hidráulicas; existe un sexto parámetro, la orientación de las discontinuidades, que se introduce en función de las distintas aplicaciones (túneles, minas, cimentaciones y taludes) y que no tiene carácter intrínseco.

$$\text{RMR} = A + B + C + D + E + (F) \quad (2)$$

A: Resistencia de la roca matriz, B: RQD, C: Espaciamiento de las discontinuidades, D: Características de las discontinuidades, E: Influencia del agua, F: Orientación de las discontinuidades.

En función del resultado final del RMR, se asignó una clase y una calidad del macizo rocoso (Tabla I).

Tabla I. Calidad del macizo rocoso en función del RMR (Bieniawski, 1989).

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

A su vez, el RMR puede correlacionarse con la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) del macizo (Bieniawski, 1976). En las siguientes ecuaciones se muestran las relaciones entre RMR y los parámetros mencionados:

$$c = 5 \cdot \text{RMR} \text{ (kPa)} \quad (3)$$

$$\phi = 5 + \frac{\text{RMR}}{2} \text{ (}^\circ\text{)} \quad (4)$$

El método Q-slope de Bar y Barton (2017), basado en el índice Q de Barton *et al.* (1974), y utilizado frecuentemente para analizar la estabilidad de taludes en roca, se calcula mediante la ecuación:

$$Q = \frac{\text{RQD}}{J_n} \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0 \cdot \frac{J_w \text{ice}}{\text{SRF}_{\text{slope}}} \quad (5)$$

siendo el RQD el índice de calidad de la roca, J_n : número de familias de discontinuidades, J_r : coeficiente de rugosidad de las juntas, J_a : coeficiente de alteración de las juntas, O : factor de orientación de las discontinuidades, J_w : coeficiente reductor por la presencia de agua, SRF: factor reductor por tensiones en el macizo rocoso.

Los valores de los parámetros de la fórmula se asignan con las tablas del anexo 9, así, se obtuvo el valor de Q-slope, que junto al ángulo del talud (β), permite clasificar la estabilidad del macizo rocoso mediante la gráfica de la figura 6, dividiendo los taludes en los campos: estables, inestables o de estabilidad incierta.

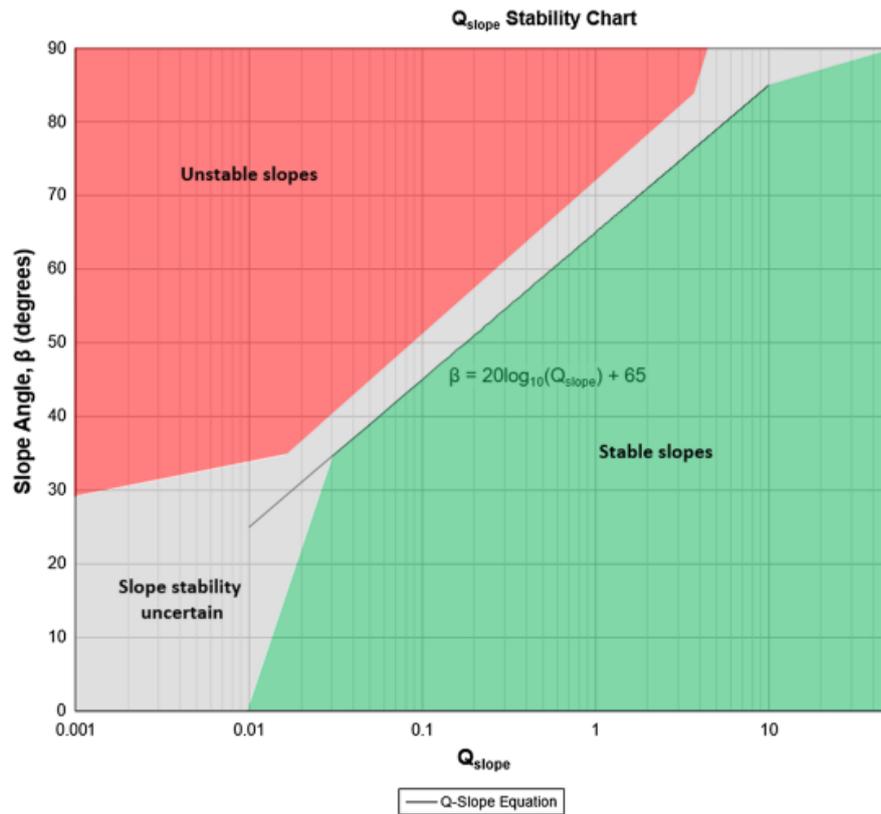


Figura 6. Gráfico de estabilidad Q-slope (Bar y Barton, 2017).

El SMR (Anexo 10) constituye una modificación del RMR para taludes, definiéndose unos factores de ajuste por orientación de las discontinuidades y por el método de excavación. El primero de ellos es producto de los subfactores F1, F2 y F3, que se relacionan con el paralelismo de las discontinuidades y el plano del talud, del buzamiento de la discontinuidad y la relación entre el buzamiento del talud y la discontinuidad, respectivamente (Anexo 10). El último de los factores, F4, se relaciona con el método de excavación.

$$\text{SMR} = \text{RMR} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (6)$$

El procedimiento consiste en determinar el SMR para cada familia de discontinuidades, considerando el menor de los valores obtenidos como el SMR del talud estudiado.

El resultado obtenido es un valor numérico, el cuál se asigna a una clase y descripción, además de indicar su estabilidad, roturas esperables y tratamiento recomendado (Tabla II), estando este último dividido en 6 clases de sostenimiento (Tabla III, Anexo 11).

Tabla II. Clasificación SMR para taludes (Romana, 1997).

Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Tabla III. Tratamiento para taludes basado en la clasificación SMR (Romana, 1997).

SMR>65	70>SMR>45	75>SMR>30	60>SMR>20	40>SMR>10	30>SMR>10
Sin sostenimiento	Protección (valladas de pie o de talud, zanjas de pie, redes sobre la superficie del talud)	Refuerzo (bulones, anclajes)	Hormigón (gunita, hormigón de relleno, contrafuertes y/o vigas, muros de pie)	Drenaje (superficial, profundo)	Reexcavación (tendido, muros de contención)

2.4. Cartografía geomorfológica

Se elaboró la cartografía geomorfológica de la zona de estudio que incluye los principales elementos geomorfológicos observados que se han agrupado siguiendo un criterio genético. Así, se han reconocido formas de erosión y depósito originadas por la acción de la gravedad, morfologías fluviales y también se ha delimitado la posición del límite superior del acantilado.

La cartografía del momento actual se llevó a cabo mediante trabajo de campo y fotointerpretación de fotos aéreas y mapa LiDAR del año 2020. Además, con el fin de analizar la evolución de la zona de estudio, se elaboraron cartografías de evidencia de inestabilidad correspondientes a los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2020 mediante las ortoimágenes del PNOA, *Google Earth* y el software *ArcGIS v.10.3* (ESRI). Se ha de tener en cuenta que las ortofotos de los años 2009, 2014 y 2017 se han tomado con marea baja, por lo que en principio se pudieron cartografiar más elementos geomorfológicos.

Las formas del relieve conocidas fueron digitalizadas y representadas en el Sistema de Información Geográfica con líneas o polígonos (Tabla IV).

Tabla IV. Elementos geomorfológicos cartografiados y tipo de representación en el software ArcGIS.

Origen	Formas	Polígonos	Líneas
Gravedad	Grieta		×
	Cicatriz		×
	Depósito	×	
	Otras evidencias		×
Litoral/Mixto	Límite superior acantilado		×
Fluvial	Valle colgado		×

Las formas de gravedad son todos aquellos rasgos geomorfológicos que se pueden relacionar con movimientos en masa originados por la acción de la gravedad, a veces combinada con otros procesos como los litorales. Para su diferenciación se ha utilizado la clasificación de movimientos en masa de Varnes (1978), cuyo resumen se puede ver en la tabla V.

Así, se entiende por grieta las aberturas de longitud variable que resultan de la separación de dos materiales, evidenciando poca estabilidad del sustrato y que suelen ser precursoras de un movimiento en masa mayor. Las cicatrices son superficies que se generan cuando ocurre un movimiento en masa, de forma generalmente semicircular y desprovistas de vegetación, cuando la inestabilidad es reciente. En cuanto a los depósitos, se trata de acumulaciones de material que se encuentran en la base de los acantilados o en las playas cuando tiene lugar un movimiento en masa. Otros elementos cartografiados son las zonas de acantilado que presentan otras evidencias de procesos de gravedad, pudiendo ser áreas con falta de vegetación, signos de erosión, depósitos en la base del acantilado, grietas, cicatrices o morfologías irregulares. Estas zonas se han denominado otras evidencias.

Tabla V. Clasificación de movimientos en masa, basado en Varnes (1978).

Tipología	Tipo de sustrato		
	Sustrato rocoso		Suelos
Caídas	Desprendimientos	Vuelcos	-
Deslizamientos	Rotacionales	Traslacionales	-
Expansión lateral			-
Flujos	Materiales sin consolidar		
	Flujode derrubios (<i>debris flow</i>)		
	Colada de barro		
	-		Reptación superficial
Complejos	Combinación de tipos de movimientos		

El límite superior del acantilado es una forma diferenciada en la cartografía con un origen ligado, fundamentalmente, a la dinámica litoral pero en el que también pueden intervenir otro tipo de procesos como los ligados a la gravedad. Por ello se ha considerado un origen mixto para esta línea que representa la parte superior del escarpe del acantilado. Su cartografía, se ha llevado a cabo tanto para el momento actual, como para los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2020.

En cuanto al modelado fluvial de la zona, cabe destacar la presencia de valles colgados, relacionados con una subida del nivel del mar más rápida que la velocidad con la que los ríos acomodan su perfil longitudinal (Mary, 1983). Esta erosión diferencial está relacionada con el periodo posglacial en el Holoceno, durante la transgresión Flandriense, afectando a la costa asturiana hace 6000 años (Flor y Cambor, 1989).

Complementariamente a lo anterior, se representó en la cartografía los afloramientos de depósitos de rasa que se encuentran a lo largo del tramo de senda costera.

2.5. Elaboración de modelos digitales del terreno

Para obtener el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se descargaron del CNIG seis ficheros LiDAR (formato *.laz*) que incluyen la zona de estudio. Una vez descargados, se convirtieron los archivos a formato *.las*, para un mejor tratamiento de los datos con *ArcGIS*. A continuación, se eliminó la señal de la vegetación y las interferencias en el MDE con el filtro *Ground*. Finalmente, se ejecuta el comando *LAS Dataset to Raster* seleccionando el tipo de interpolación y definiendo el *sampling value* como 2 para obtener la resolución del MDE como ráster

Así, se obtuvo un MDE con tamaño de celda 2×2 m, el cuál sirvió para elaborar otros modelos digitales del terreno, como el de sombreado (MDS), el de pendientes (MDP) y orientaciones (MDO). Estos modelos digitales fueron útiles para la caracterización de los movimientos en masa, ya que permitieron conocer las características del terreno donde son más frecuentes.

2.6. Perfiles transversales de acantilados

De forma complementaria, se trazaron tres perfiles topográficos transversales a la línea de costa del cabo (Fig. 7) en función de las zonas más características de la zona de estudio, siendo estas la playa de Bozo, la punta del cabo y el valle colgado del sector oriental. Con ello, se podrá conocer la orografía de la zona de estudio en distintas secciones del cabo, pudiendo relacionarse con la geología o geomorfología de la zona. Así, se han construido siguiendo el siguiente flujo de trabajo: 1) crear tres archivos *shapefile (polyline)*, 2) *3D Analyst Tools/Functional Surface/Interpolate Shape*, combinando el MDE y los archivos creados anteriormente, aportando elevaciones a los perfiles, 3) herramienta *3D Analyst/Profile Graph*, se obtiene el perfil topográfico.

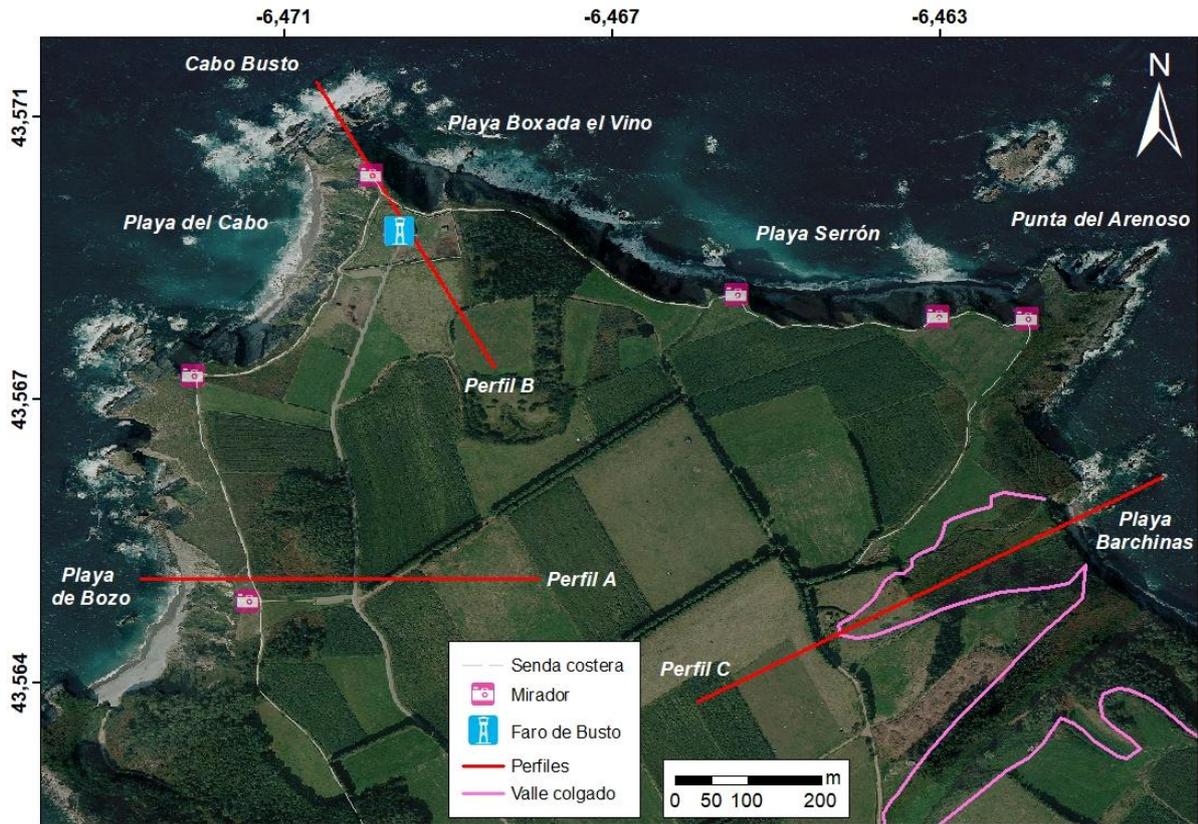


Figura 7. Ubicación de los perfiles realizados (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

2.7. Modelización de caída de rocas en la playa de Bozo

En la playa de Bozo, extremo occidental del Cabo Busto, se simuló la trayectoria de la caída de rocas con el software *RocFall2 v8.018 (Rocscience)* en dos perfiles situados en áreas con indicios de fenómenos de gravedad y trazados transversalmente al acantilado (Fig. 8). Ello permitió visualizar la trayectoria de los desprendimientos y disponer de gráficos como la distancia que recorren las rocas, el alcance y la energía cinética total de las mismas. Los perfiles topográficos se obtuvieron a partir del MDE de la zona.

Se realizaron 500 simulaciones de caída de rocas, mediante el método *Lumped mass*, a partir del área fuente (de tipo *Line Seeder*) situado en la cornisa o parte superior del acantilado. Se consideraron bloques con una masa de 1.000 kg y una densidad media equivalente a 2,612 g/cm³, iniciando el desplazamiento con una velocidad horizontal de 0,1 m/s.

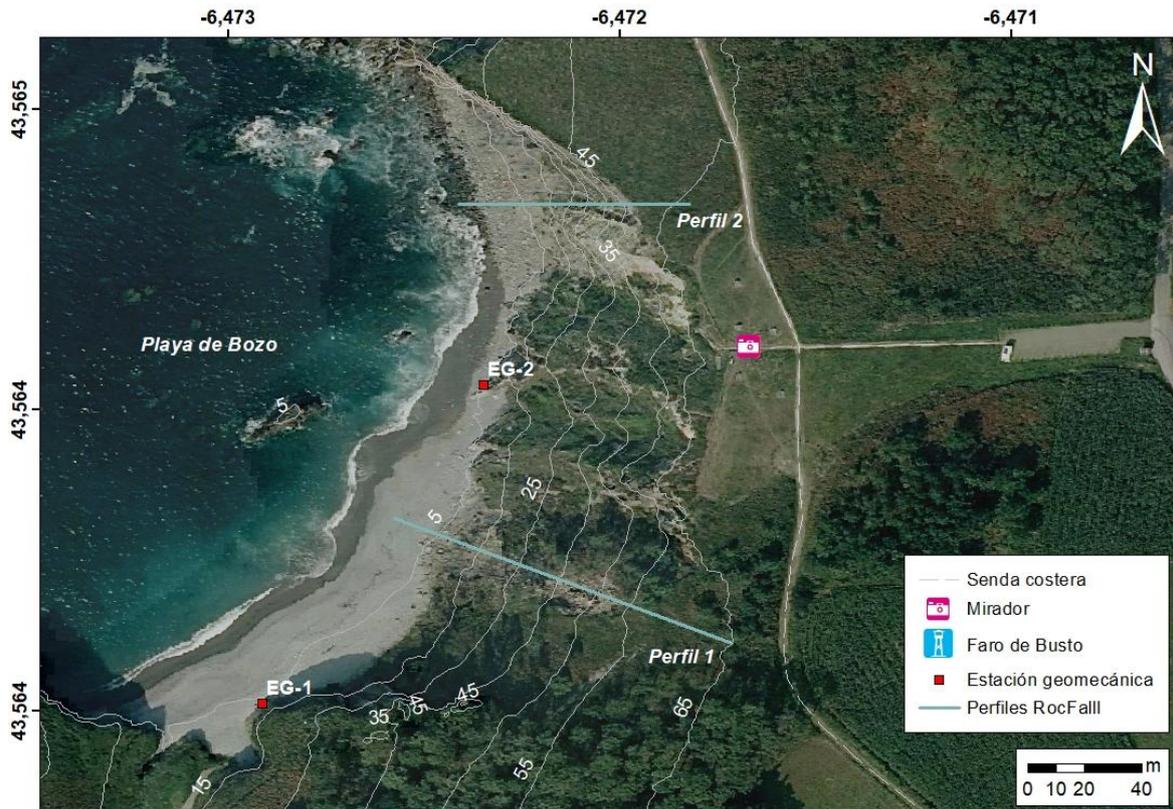


Figura 8. Trazado de los perfiles considerados en la modelización de caída de rocas (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

2.8. Zonificación de la senda costera

La zonificación del tramo de la senda estudiado refleja la susceptibilidad de los procesos de caída de rocas, es decir, la probabilidad espacial de que ocurran fenómenos de caída de rocas tanto de los acantilados próximos al tramo de senda costera estudiado como de la propia senda, sin precisar el momento temporal. Para ello, se utilizaron los modelos digitales de pendientes, orientaciones y elevaciones, así como el mapa geológico y de vegetación de la zona. Se reclasificó cada capa aplicando criterio experto para obtener valores de favorabilidad variables entre 0 y 10 (Tabla VI), siendo 10 el valor que representa una mayor probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de gravedad.

Para el MDE se separaron zonas cada 15 m, asignando valores mayores a mayor elevación, pues la susceptibilidad aumenta con la altitud. Para el MDP se dividieron las zonas de 0-10° con valor 1, de 10-30° con valor 4, de 30-45° con valor 6, de 45-60° con valor 8, y de 60-90° con valor 10. A pendientes más acusadas, la ocurrencia de ciertos tipos de fenómenos de gravedad, como las caídas y vuelcos, aumenta. Para el MDO se dieron los valores máximos para los acantilados orientados hacia el suroeste y norte, ya que, observando la cartografía, en estos se concentran las inestabilidades.

Desde el punto de vista de la vegetación (Anexo 18), teniendo en cuenta su capacidad para fijar el sustrato, se asignó valor máximo a la vegetación halófila de acantilados, tratándose

prácticamente de roca desnuda en muchos puntos y por tanto de zonas más propensas a las inestabilidades, seguido de prados y pastos, arbustos (brezales, tojaes y matorrales de brechina) y cultivos y plantaciones de coníferas, siendo estos últimos el tipo de vegetación con mayor capacidad de retener (valor 1).

En cuanto a la litología, la única representada en la zona de estudio corresponde a las cuarcitas de la Serie de los Cabos, por lo tanto, esta variable no influye en la susceptibilidad de la senda costera.

Una vez se dispone de la matriz de valoración (Tabla VI), se intersectan las capas mencionadas con el comando *Intersect*. Así, se añadirá un nuevo campo en la tabla de atributos, en el que se dispondrán los valores finales de susceptibilidad. Para ello, se multiplica el valor asignado de cada variable por un valor de ponderación variable entre 0,1 y 0,4 (Tabla VI). Este factor permitió otorgar diferentes pesos, considerando las variables de pendiente y elevación como las más importantes, seguidas de la orientación y vegetación, sumando finalmente todos los valores. Como resultado final de las operaciones, se obtuvo un mapa de susceptibilidad de la zona de estudio, dividiendo las áreas en 5 clases de susceptibilidad: Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta (Tabla VII).

Para una óptima visualización de los datos, se delimitó una zona de influencia de 120 m a ambos lados del trazado de la senda. Así, intersectando dicha zona con el mapa de susceptibilidad se obtuvo un mapa centrado en los acantilados de Cabo Busto.

Finalmente, se realizó un cruce entre el mapa de susceptibilidad y la polilínea que recoge el trazado de la ruta cercana al frente del acantilado, mostrando los diferentes grados de susceptibilidad de los distintos tramos de la senda.

Tabla VI. Matriz de valoración de las diferentes variables consideradas para obtener el mapa de susceptibilidad.

Ponderación	Variable	Tipos/rangos	Valor
0,4	Elevaciones (m)	0-15	1
		15-30	4
		30-45	6
		45-60	8
		60-75	10
0,4	Pendientes (°)	0-10	1
		10-30	4
		30-45	6
		45-60	8
		60-90	10
0,2	Orientaciones (°)	0-67,5 (N)	8
		67,5-157,5 (E)	1
		157,5-247,5 (O)	5
		247,5-337,5 (S)	10
		337,5-360 (N)	2
0,1	Vegetación	Vegetación halófila de acantilados	10
		Prados y pastos	8
		Cultivos y plantaciones	1
		Brezales, tojales y matorrales de brechina	6

Tabla VII. Susceptibilidad en función del valor de celda.

Susceptibilidad	Valor
Muy baja	<6
Baja	6-8
Media	8-10
Alta	10-12
Muy alta	12-14

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Orografía de la zona de estudio

A partir de los modelos digitales del terreno se ha descrito la orografía de la zona de estudio y caracterizado los elementos geomorfológicos cartografiados, ya que aportan información sobre su origen y localización preferente.

Así, el MDE (Fig. 9) divide el cabo en cinco clases, agrupando las altitudes en rangos entre 0-15 m, 15-30 m, 30-45 m, 45-60 m y 60-75 m. El MDP (Fig. 10) muestra los distintos valores de pendiente que tienen las zonas de acantilados. Este modelo se divide en cinco clases, siendo entre 0-10°, 10-30°, 30-45°, 45-60° y 60-90°. El MDO (Fig. 11) indica la orientación de los acantilados de la zona estudio, siendo norte, sur, este y oeste.

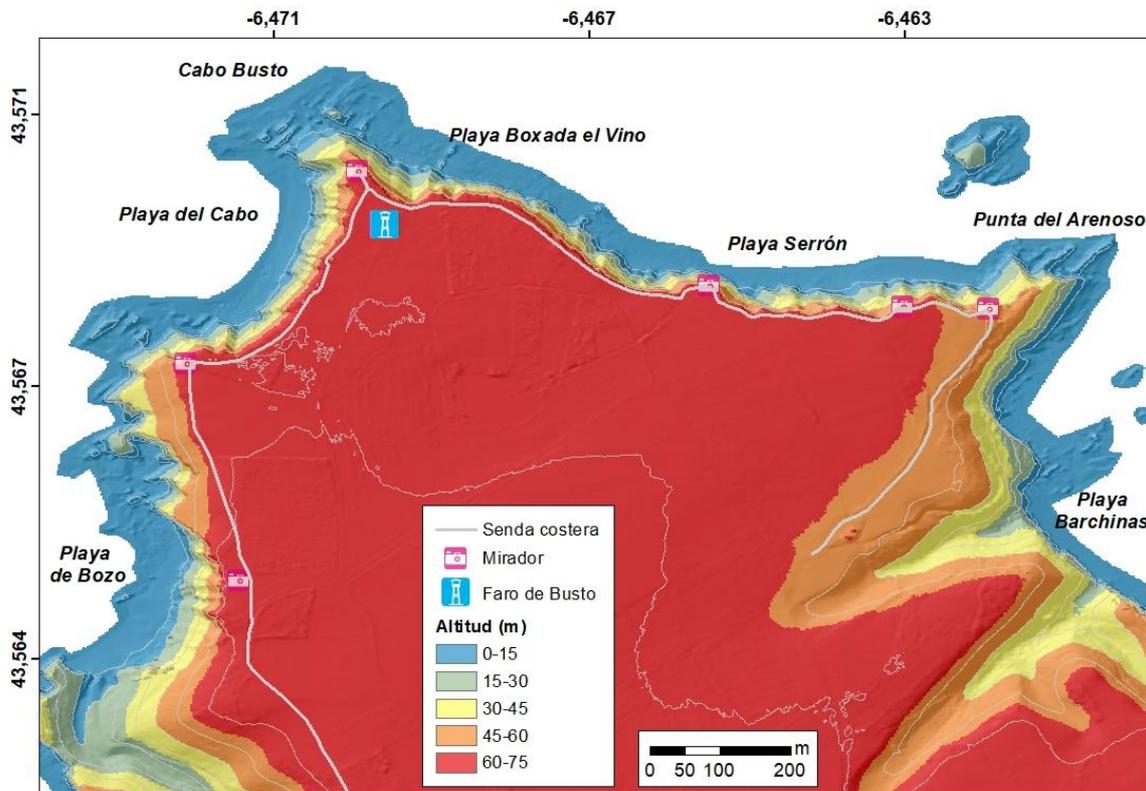


Figura 9. Modelo digital de elevaciones del entorno de Cabo Busto (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

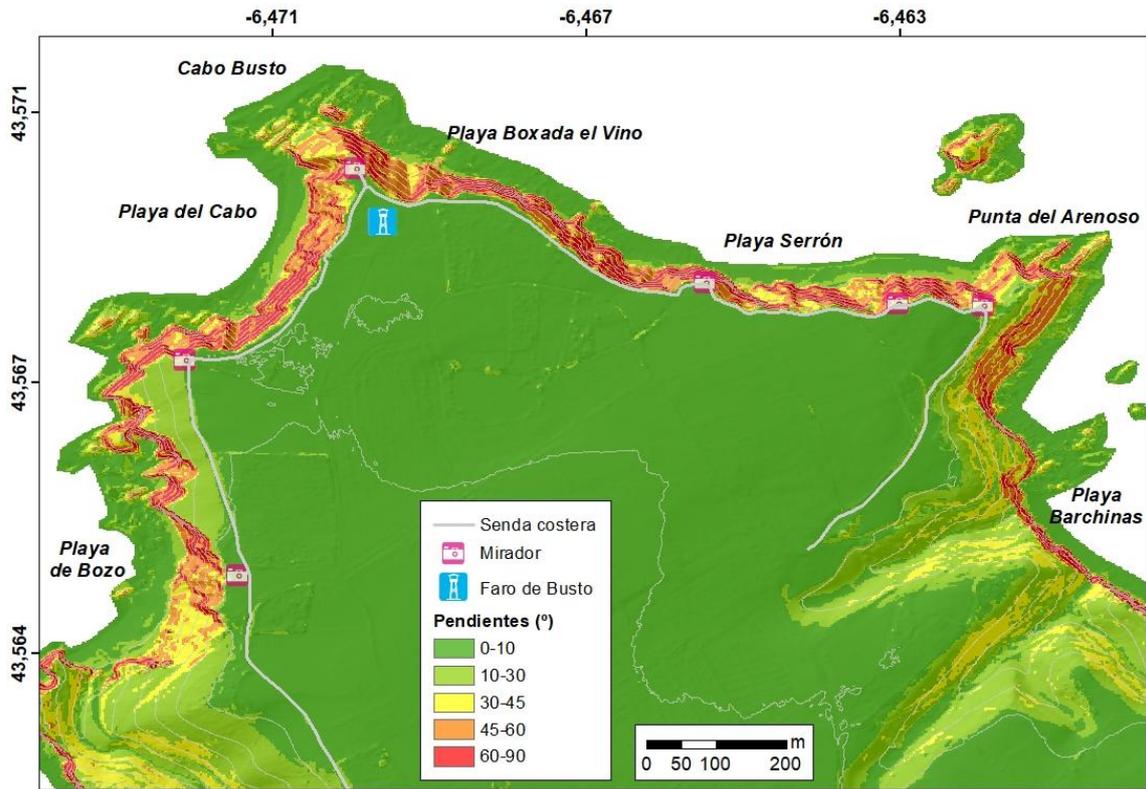


Figura 10. Modelo digital de pendientes de Cabo Busto (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

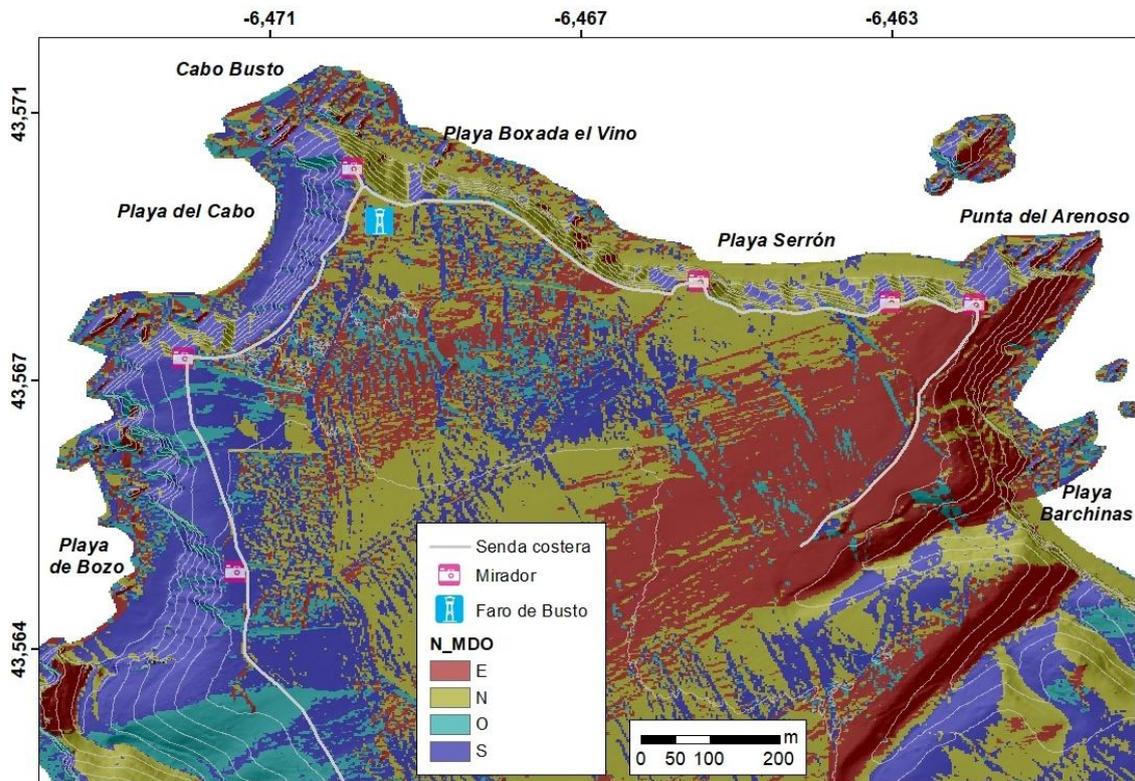


Figura 11. Modelo digital de orientaciones de Cabo Busto (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

Como información complementaria a la descripción aportada por los MDT de la zona de estudio, se muestran los resultados de los tres perfiles topográficos realizados, dispuestos transversalmente a la costa (Fig. 7). Ello ha permitido visualizar en distintas secciones la morfología de los acantilados y las características de la rasa costera.

El perfil A (Fig. 12) se sitúa en el sector de la playa, con una orientación O-E y una longitud de 400 m. Principalmente se distinguen tres elementos:

- Superficie de rasa, con morfología plana y con una altura de 68,2 m.
- Zona acantilada, con una inclinación de 82°.
- Playa, en este caso la playa de Bozo, con depósitos de gravas y cantos.

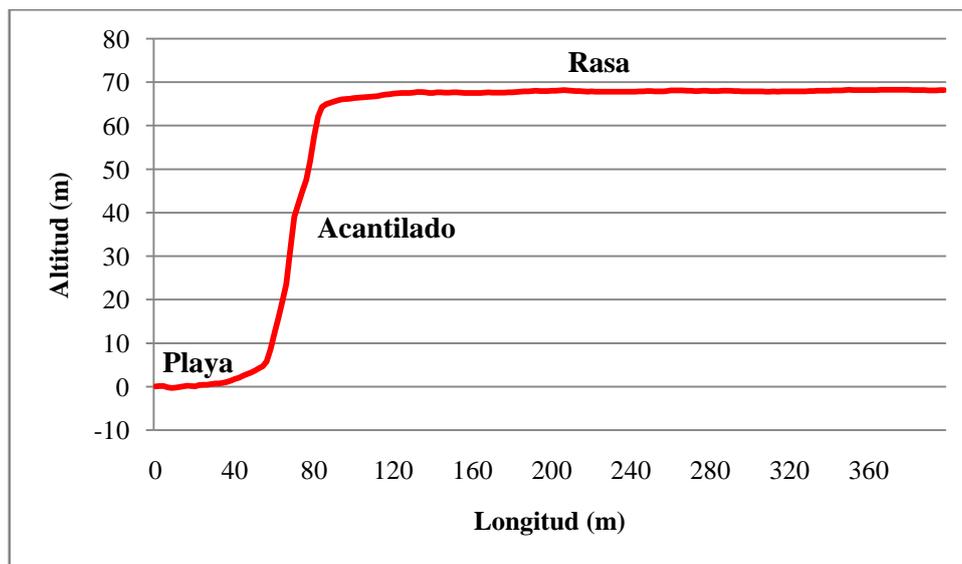


Figura 12. Perfil A.

El perfil B (Fig. 13) se sitúa cortando el cabo con una orientación NO-SE, teniendo una longitud de 430 m (Fig. 7). Al igual que en el perfil anterior, se distinguen tres elementos:

- Superficie de rasa, de morfología plana, situada a una altura de 64,5 m.s.n.m., a diferencia de la sección de rasa del perfil 1, ésta buza ligeramente (4°).
- Zona acantilada, con una inclinación de 76°. Se encuentra más horizontal que el perfil A, además de tener una superficie más irregular. Este rasgo podría deberse a la litología que corta el perfil, ya que se trata de pizarras de la Serie de los Cabos, y no de cuarcitas, siendo el caso de la playa de Bozo.
- Islotes, en este caso no hay zona de playa.

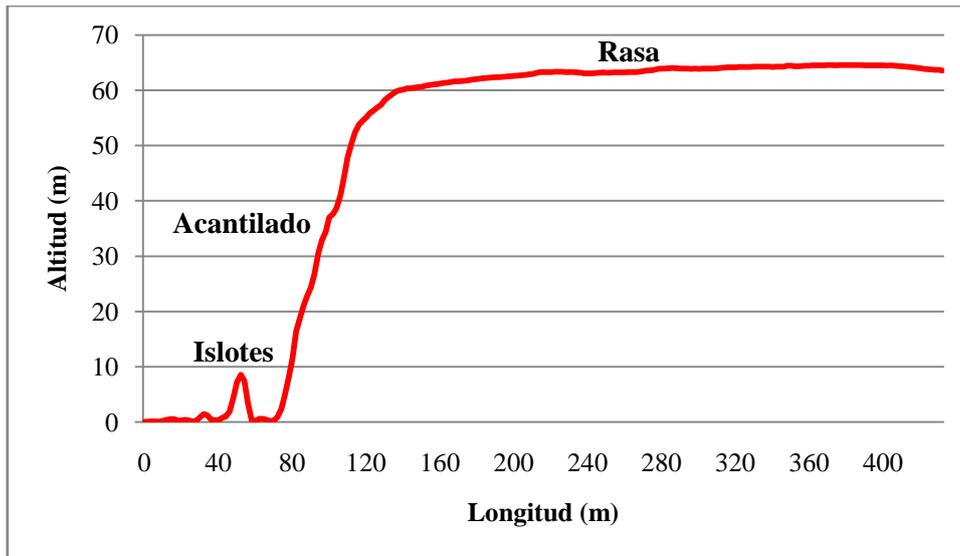


Figura 13. Perfil B.

En el caso del perfil C (Fig. 14) se ha trazado longitudinalmente a un valle colgado (Fig. 7, Anexo 17), en dirección NE-SO y una longitud de 550 m. Estos son los únicos elementos fluviales que destacan en Cabo Busto, estando delimitados hacia el interior por la superficie de rasa y cuyas desembocaduras se encuentra en la costa. Concretamente en la zona de estudio hay dos valles colgados, de morfología estrecha (anchura media de 100 m) con longitudes, desde el interior hasta el punto de desagüe, de aproximadamente 260 m, en el caso del cortado por el perfil C, o de 410 m, del valle de mayor tamaño.

La superficie de rasa tiene una morfología plana y una altura de 64,6 m, mientras que el acantilado adyacente tiene una inclinación muy acusada, de 84°. Además, se puede estimar el punto de desagüe de este valle, estando a alrededor de 25 m de altura. Seguidamente se diferencia una zona de playa, correspondiendo a la playa Barchinas.

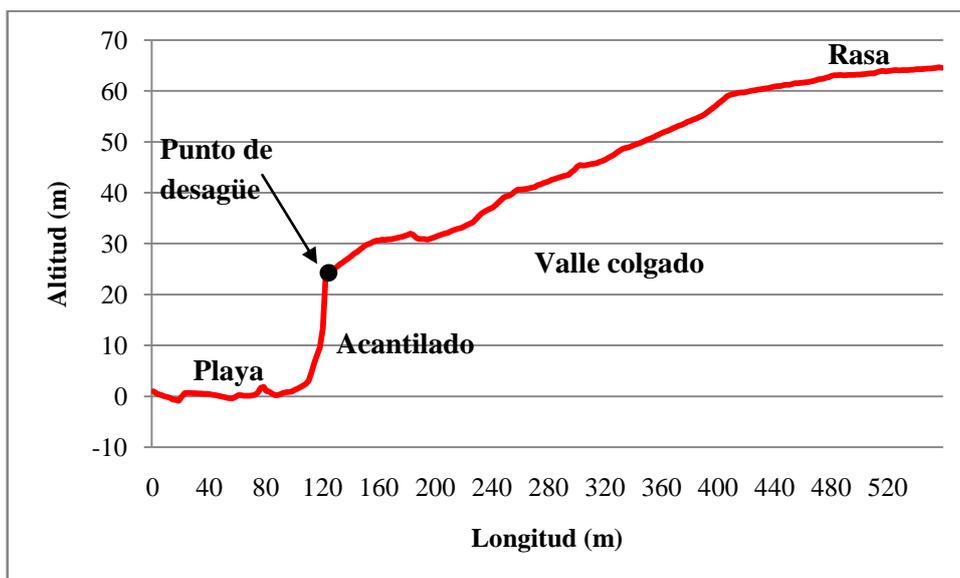


Figura 14. Perfil C.

3.2. Cartografía actual

En la figura 15 se muestra la cartografía de inestabilidades del entorno de la senda costera de Cabo Busto correspondiente al año 2022 realizada mediante fotointerpretación y trabajo de campo. En ella se han incluido formas de gravedad, como grietas, cicatrices, depósitos y otras evidencias, una delimitación de la parte superior del acantilado y valles colgados.

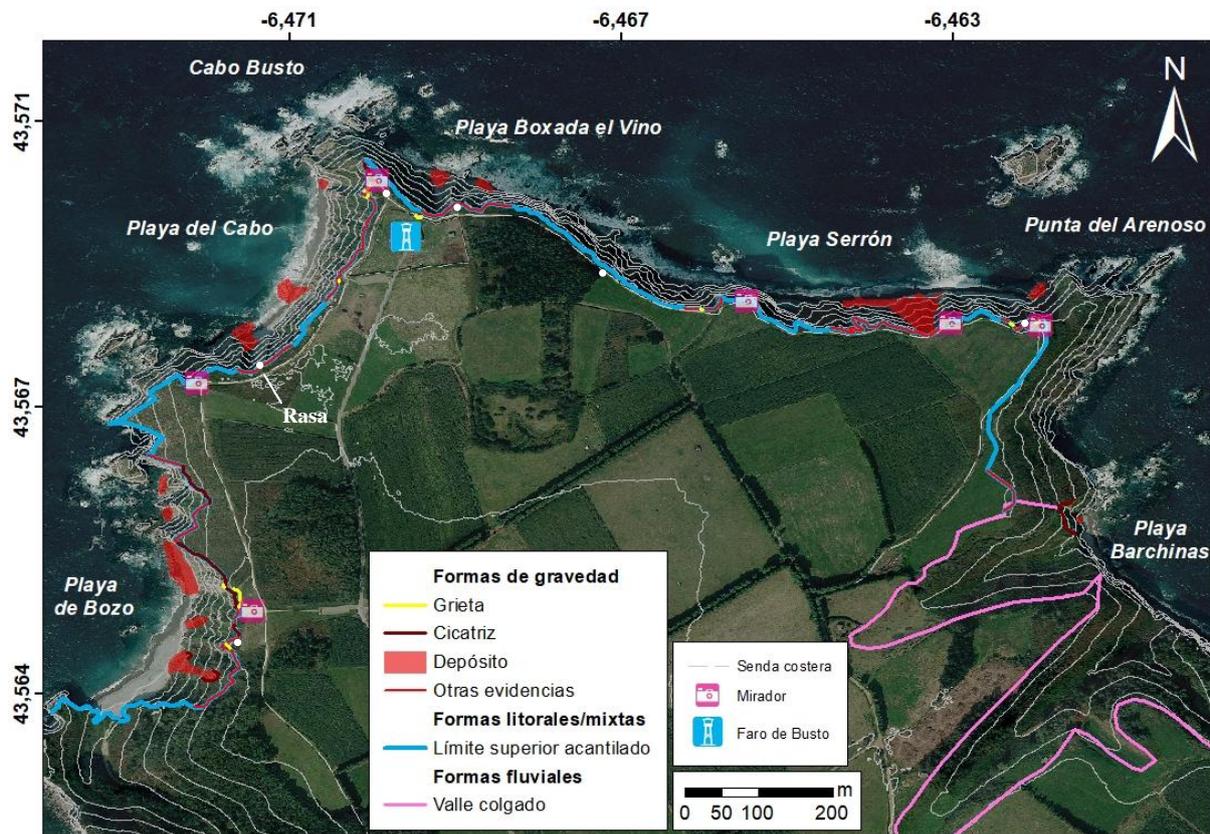


Figura 15. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2022 (OrtoPNOA 2022 CC-BY 4.0 scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

Las cicatrices, con formas irregulares o en semicírculo (Fig. 16A y B), se observan en general en el borde superior del acantilado, afectando tanto a los depósitos superficiales (cantos y arenas poco consolidados) situados sobre la superficie de rasa (Fig. 17A) como al sustrato de cuarcitas y pizarras. Se han identificado un total de diez cicatrices, de las cuáles siete se sitúan en el sector occidental del cabo (Fig. 15, Anexo 12). Éstas pueden llegar a tener decenas de metros, desarrollándose a alturas normalmente superiores a 60 m y pendientes pronunciadas, en torno a 60°, aunque ocasionalmente se pueden encontrar entre 45° y 60°; preferentemente se desarrollan en secciones de acantilado orientados hacia el suroeste.

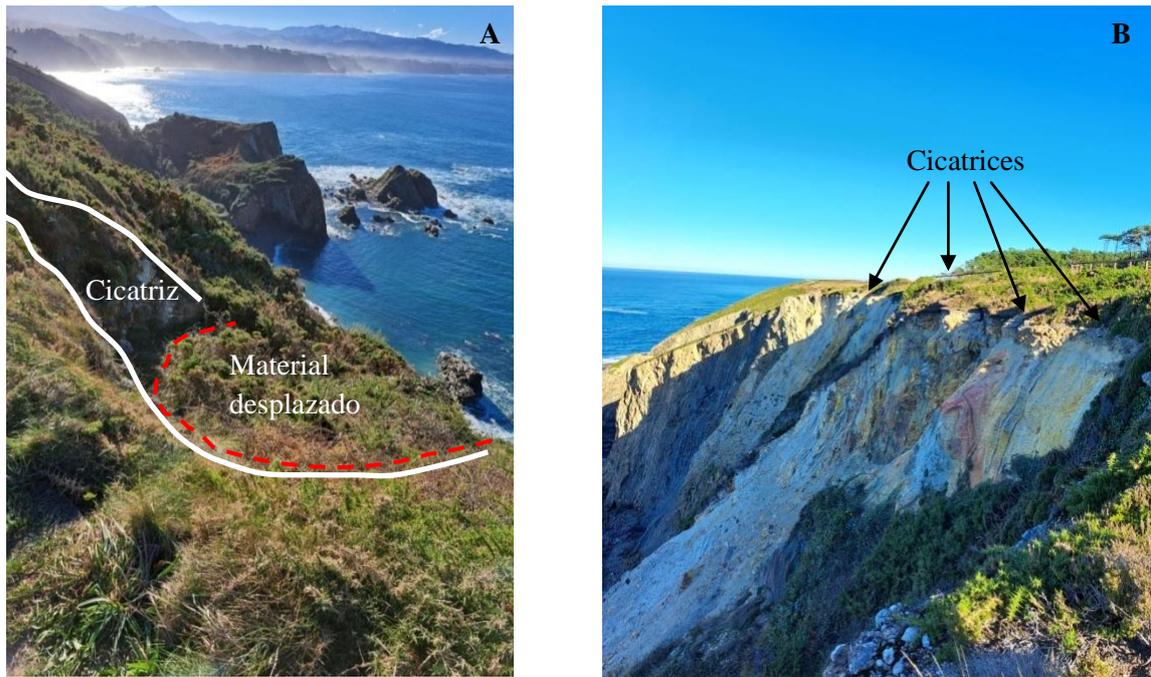


Figura 16. A. Cicatriz situada en la cornisa del acantilado próximo a la playa de Bozo. B. Zona activa reciente con cicatrices irregulares correspondientes a áreas fuente de procesos de gravedad en la parte alta del acantilado sobre la playa de Bozo.

A lo largo del tramo estudiado de la senda PR-AS4 se han identificado grietas subverticales que afectan a los depósitos de rasa cercanos a la cornisa del acantilado (Fig. 15, Anexo 13). Muestran aberturas de hasta 25-30 cm, las cuáles generan escalonamientos en el terreno (Fig. 17A y B). Por lo general, no afectan directamente al trazado de la ruta, a excepción de una grieta (Fig. 17C) que ocasiona el hundimiento del terreno (Fig. 17), descalzando el muro que delimita la parcela del faro.

Cabe destacar la presencia de este tipo de grietas en el mirador del faro (Fig. 17A y B), el punto más visitado de la senda costera.

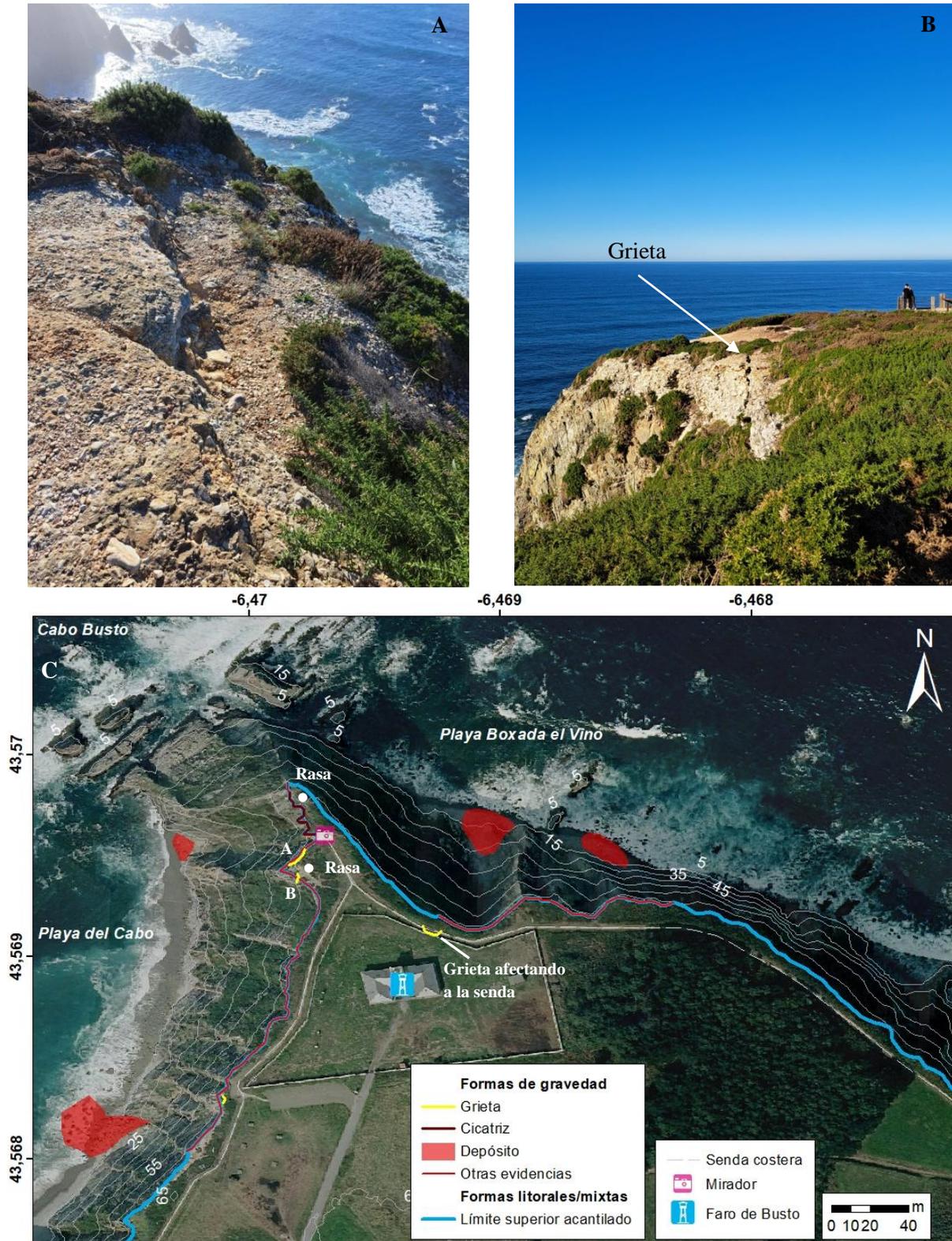


Figura 17. A. Grieta y hundimiento del terreno. B. Grieta abierta vertical con trazado paralelo a la senda costera. C. Detalle de la cartografía realizada en el entorno del mirador del faro (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

En cuánto a los depósitos de gravedad (Anexo 14), de acuerdo a Varnes (1978), se trata mayoritariamente de caídas o desprendimientos, debido a la naturaleza rocosa del sustrato y de sus depósitos (Fig. 15 y 17C), siendo materiales sueltos de tamaño grava y bloque de cuarcitas. Este tipo de movimiento se origina debido a la disposición de las discontinuidades del macizo rocoso, a la alternancia de materiales de distinto comportamiento mecánico, cuarcitas y pizarras, y a la influencia de factores climáticos.

Si se tiene en cuenta la mayor evidencia de movimientos de gravedad al oeste del cabo y que el oleaje y temporales del entorno de Luarca tiene una dirección predominante NO, así como la disposición del cabo, se puede prever que el oleaje y los temporales inciden, aproximadamente, de manera perpendicular a la costa occidental del cabo, siendo este un factor desencadenante principal de las inestabilidades en la playa y resto del sector oeste del cabo.

Se ha prestado especial atención a la playa de Bozo, en la que se observan cicatrices y grietas que afectan al mirador situado sobre la misma (Fig. 18, Fig. 16A y B) y depósitos de gravedad situados en la base del acantilado de la propia playa (Fig. 18A y B).

El movimiento en masa que se muestra en la figura 18A debido al alto grado de deformación del depósito, se podría considerar un flujo de derrubios, descartando que se haya formado por desprendimientos ya que las partículas del sustrato rocoso no han experimentado caída libre. En la figura 18B se puede observar un movimiento en masa complejo, que se inició con desprendimientos en el escarpe superior del acantilado, evolucionando a un flujo.

En la cartografía del entorno de la playa (Fig. 18) se constata una menor presencia de morfologías asociadas a movimientos de gravedad en la zona sur, lo que podría deberse a disposiciones menos favorables de las familias de discontinuidades para generar roturas de los materiales que componen esta zona de acantilado.

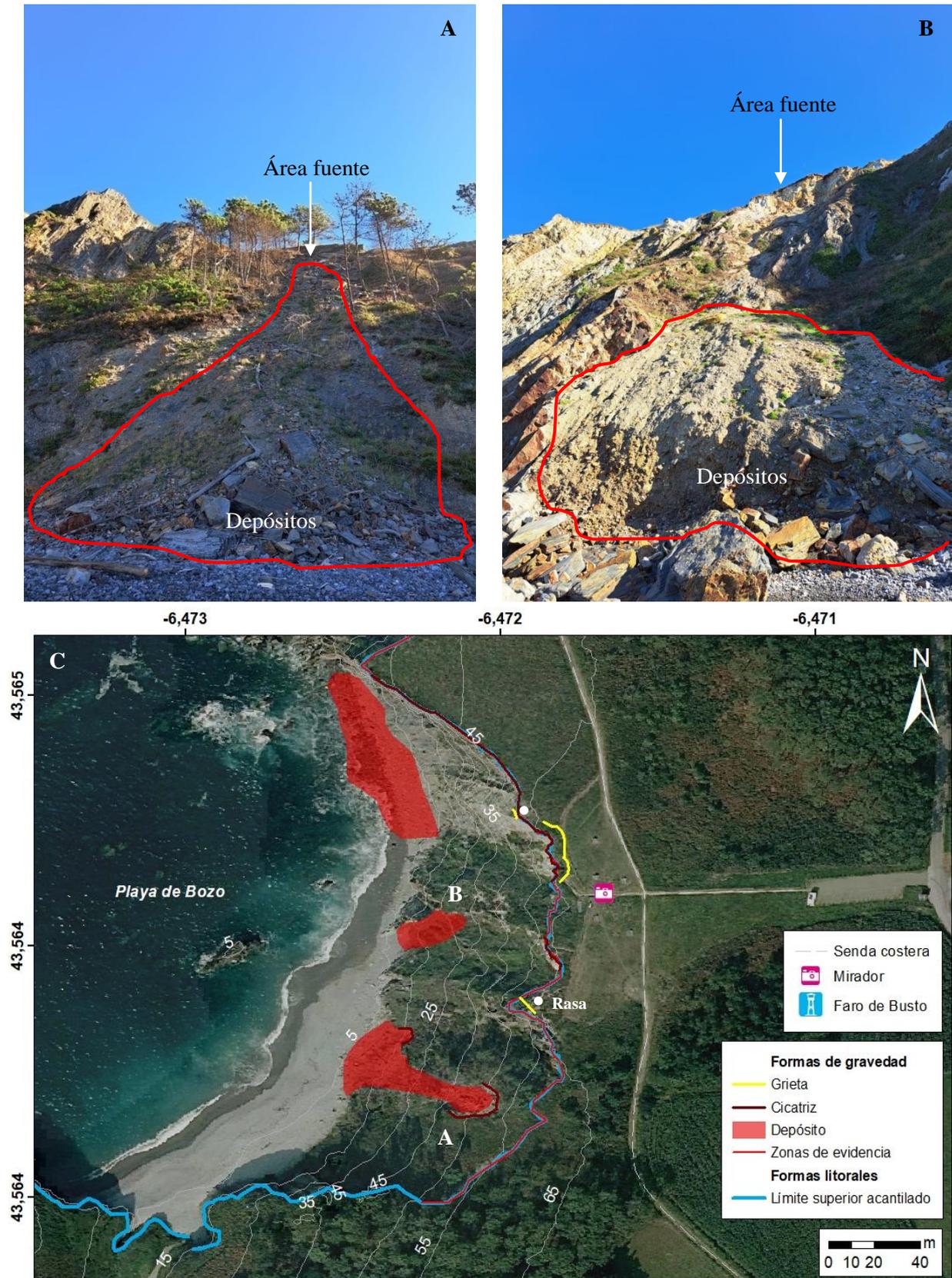


Figura 18. A y B. Depósitos originados por procesos de gravedad acumulados en la playa de Bozo. C. Detalle de la cartografía realizada en la playa de Bozo (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

Otros elementos recogidos en la cartografía son el límite superior del acantilado y las zonas con otras evidencias de inestabilidad (Fig. 15, Anexo 15 y 16), delimitando dichas zonas en función de la presencia de grietas, cicatrices, depósitos de gravedad, escasez de vegetación o morfologías irregulares. En total, se han cartografiado ocho zonas siendo las más extensas, las situadas al oeste de Cabo Busto (Fig. 15).

3.3. Cartografía histórica

Las cartografías de inestabilidades elaboradas a partir de las ortofotografías del PNOA de los años 2006, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2020, y la cartografía actual, han permitido reconocer y analizar la evolución de los acantilados del entorno de Cabo Busto en los últimos 16 años (Figs. 15, 19, 20, 21, 22, 23 y 24).

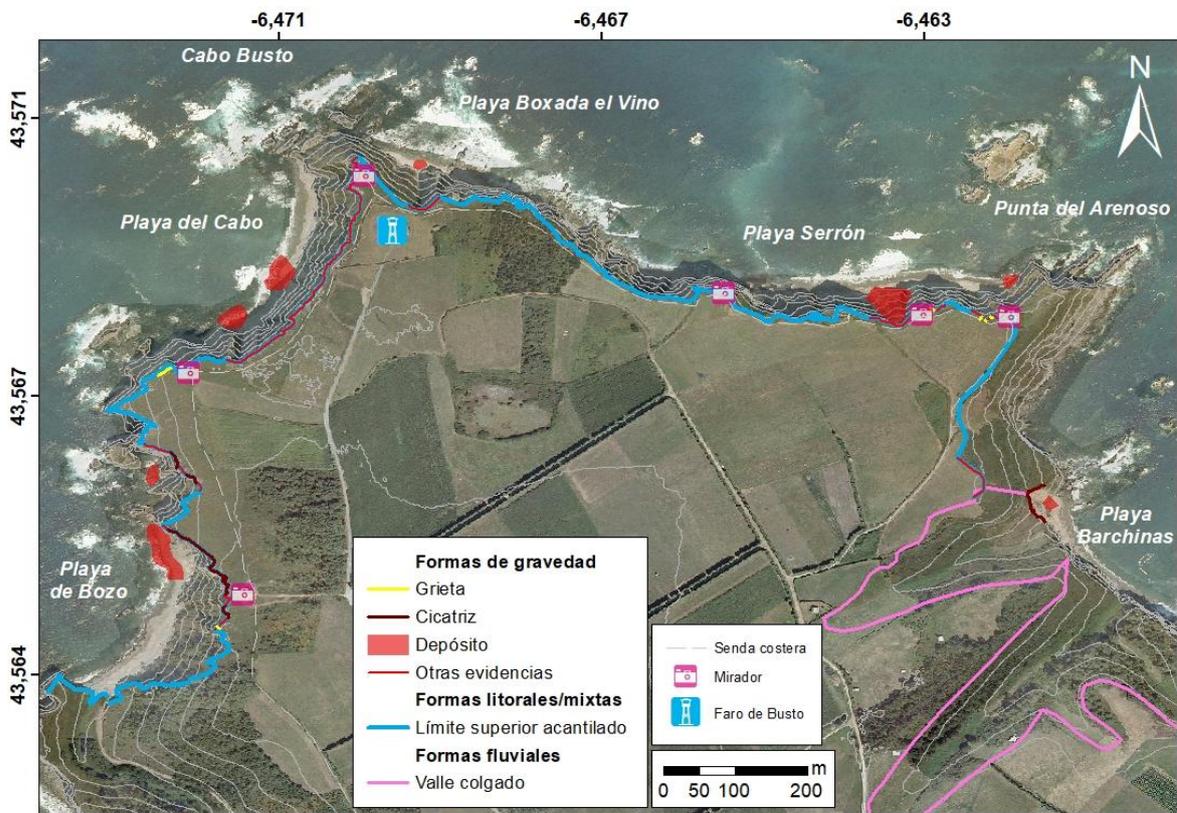


Figura 19. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2006 (OrtoPNOA2006 CC-BY 4.0scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

Análisis de estabilidad del acantilado en la senda costera del Cabo Busto (NO España)

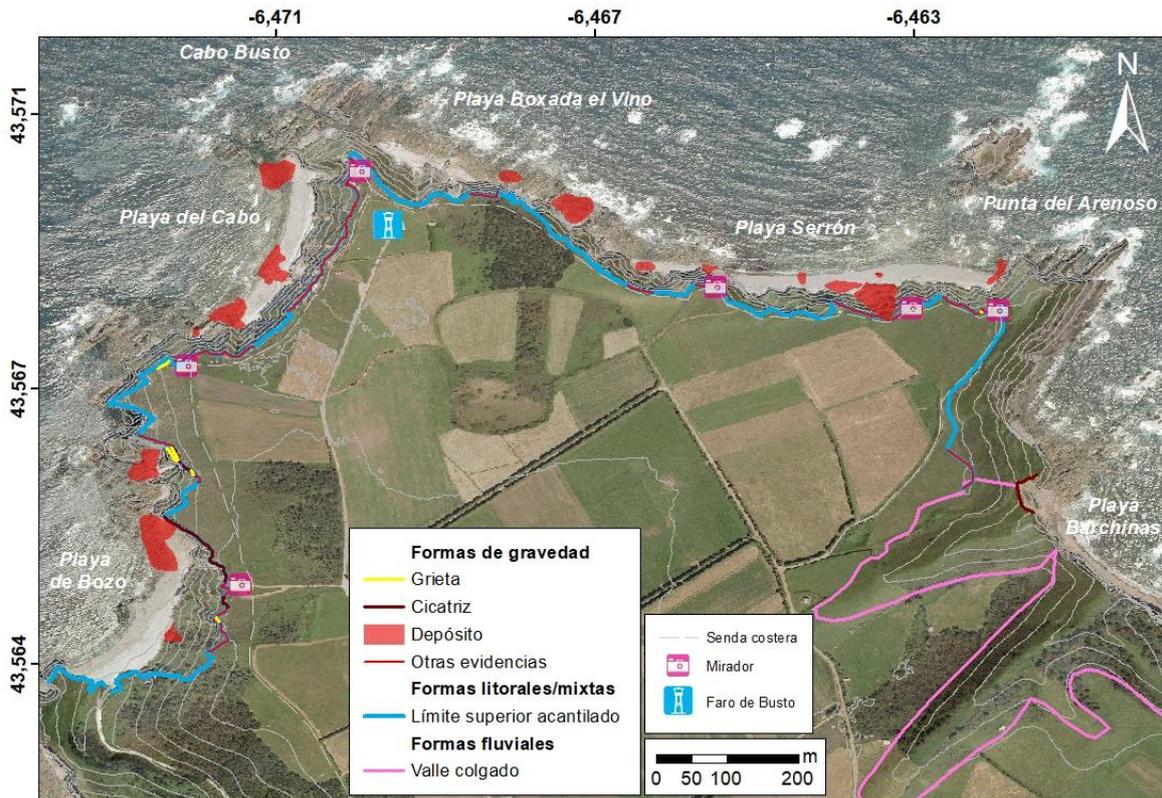


Figura 20. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2009 (OrtoPNOA 2009 CC-BY 4.0 scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

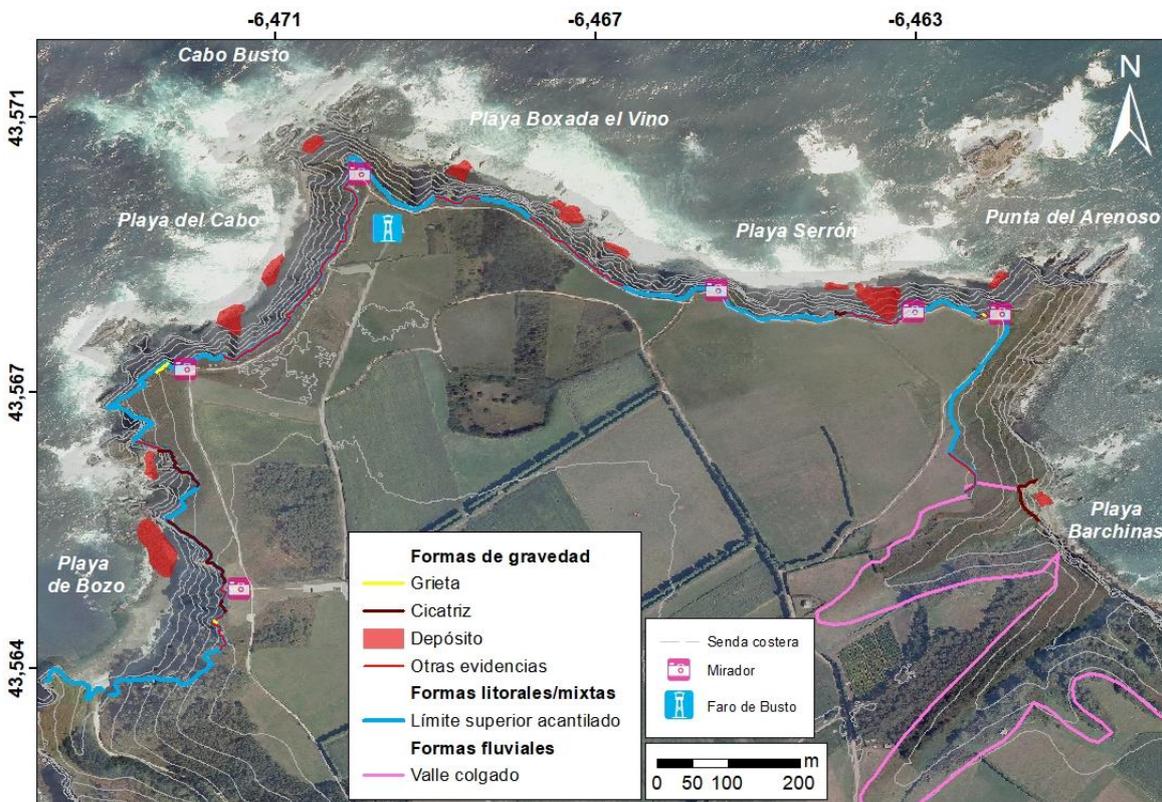


Figura 21. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2011 (OrtoPNOA 2011 CC-BY 4.0 scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

Análisis de estabilidad del acantilado en la senda costera del Cabo Busto (NO España)

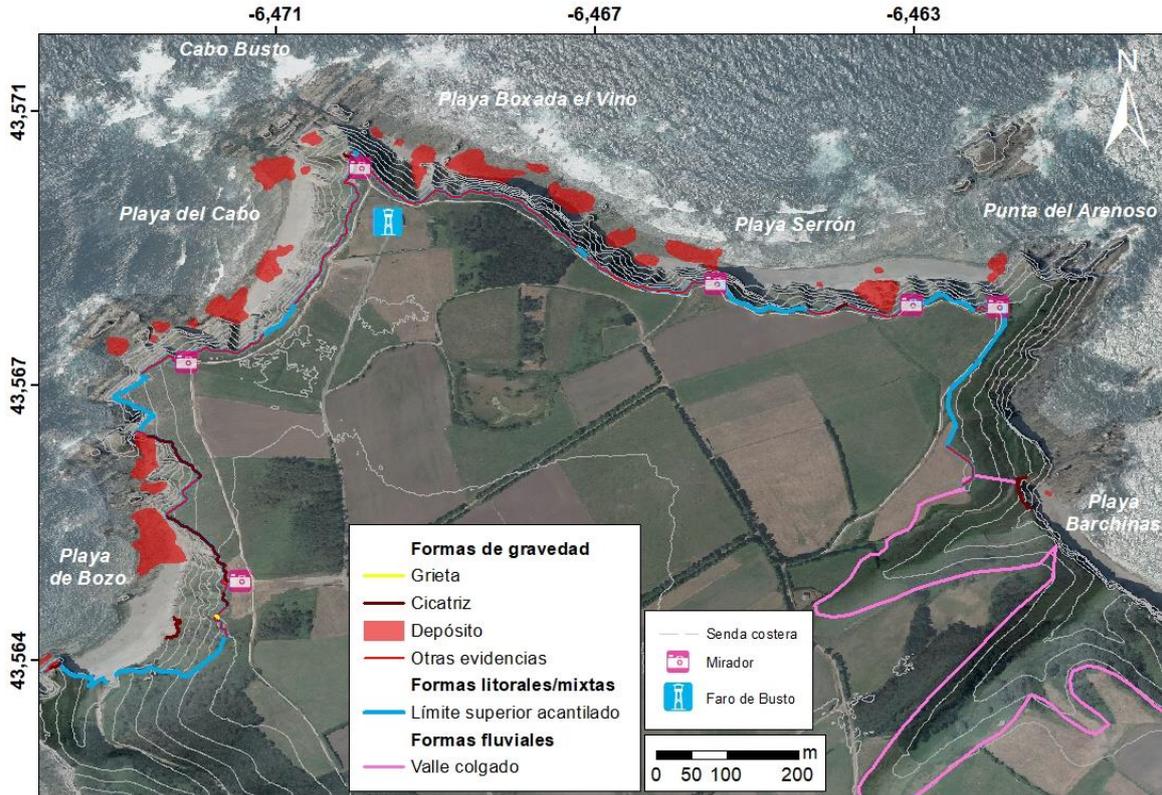


Figura 22. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2014 (OrtoPNOA 2014 CC-BY 4.0 scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

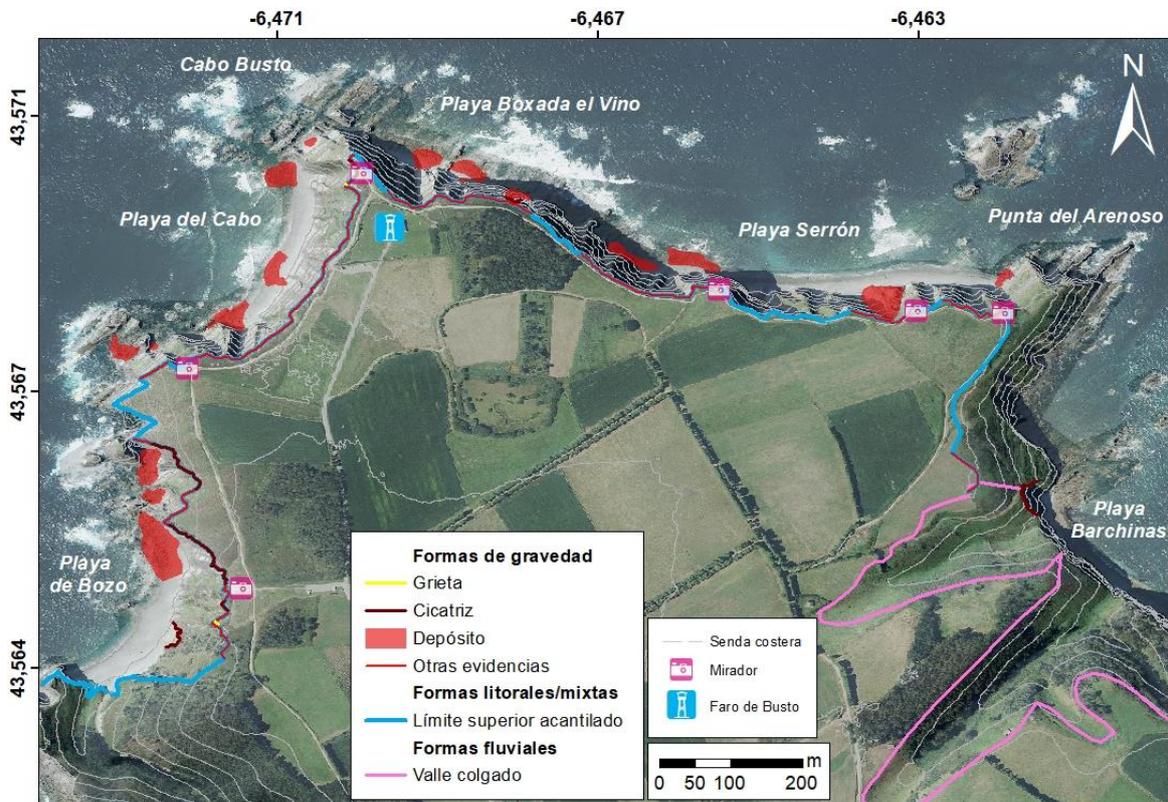


Figura 23. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2017 (OrtoPNOA 2017 CC-BY 4.0 scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

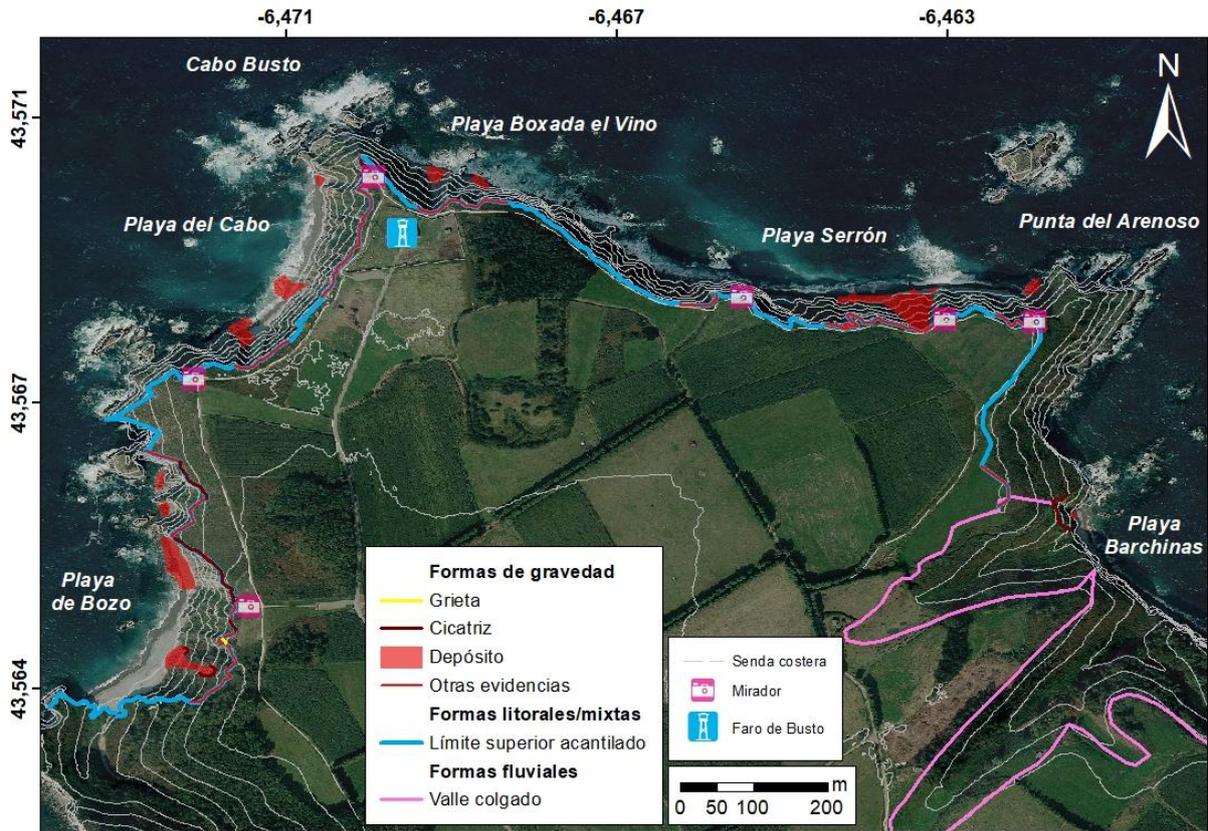


Figura 24. Cartografía de elementos geomorfológicos correspondiente al año 2020 (OrtoPNOA 2020 CC-BY 4.0 scne.es) (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

Observando estas cartografías y la gráfica 25, que representa el número de elementos geomorfológicos gravitacionales identificados en cada año, se puede decir que los acantilados de Cabo Busto tienen una importante actividad en el siglo XXI, habiendo un mayor número de procesos de gravedad en el año 2014 (Fig. 22), evidenciados por sus depósitos, 27 en total, desencadenados probablemente por los temporales ocurridos en ese mismo año.

Además, cabe destacar la menor presencia de inestabilidades en el oriente del cabo, concentrándose aparentemente en el sector occidental.

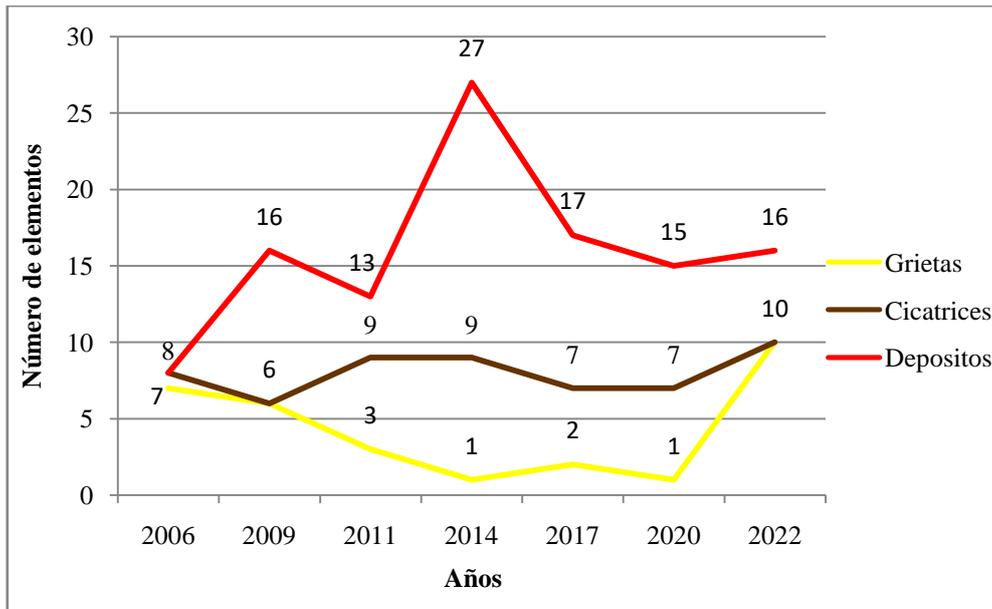


Figura 25. Gráfica de variación del número de grietas, cicatrices y depósitos de gravedad en los años estudiados.

3.4. Estudio de estaciones geomecánicas y clasificaciones geomecánicas

A continuación, se describen los resultados obtenidos de la caracterización del macizo rocosos en las cuatro estaciones geomecánicas (Fig. 3), así como las correspondientes clasificaciones geomecánicas RMR, Q-slope y SMR.

La estación geomecánica 1 (EG-1) (Anexo 1) se ubica en el occidente de la playa de Bozo, en una zona desprovista de vegetación donde afloran las cuarcitas de la Formación Serie de los Cabos, en un talud de orientación general 333/49. La resistencia de la roca matriz, tomada con un martillo Schmidt tipo L, se sitúa en 100 MPa, estimándose un grado de meteorización II (ISRM, 1989). El macizo rocoso presenta un índice $J_v = 20$, un RQD igual a 49 y un espaciado de las discontinuidades de entre 6 y 20 cm. Éstas, tienen una longitud entre 3-10 m y una abertura entre 1-5 mm, además de ser ligeramente rugosas, no tener rellenos y estar ligeramente alteradas y secas.

Para este macizo se establece un RMR de 55, correspondiendo a un macizo de clase III, de calidad aceptable (Anexo 2). De acuerdo al criterio de Bieniawski (1976), se estiman unos valores de cohesión y ángulo de fricción de 275 kPa y 32,5°, respectivamente.

Mediante proyección estereográfica se diferenciaron tres familias de discontinuidades (Fig. 26A): F1 (302/59), F2 (134/26) y F3 (301/88). El análisis geométrico y cinemático efectuado indica que no son previsible roturas planares o por vuelco, mientras que sí es factible la formación de roturas en cuña, viéndose involucradas las familias F1 y F3.

La estación geomecánica 2 (EG-2) (Anexo 3) se realizó en el oriente de la playa de Bozo, donde se localizan depósitos de caída de rocas y afloran cuarcitas de la Formación Serie de

los Cabos, en un talud de orientación general 285/67. La resistencia de la roca matriz, tomada con un martillo Schmidt tipo L, es de 130 MPa, estimándose un grado de meteorización II (ISRM, 1989). El macizo presenta un índice $J_v = 31$, un RQD de 12,7 y un espaciado de las discontinuidades que oscila entre 6 y 20 cm. Las discontinuidades por lo general están moderadamente alteradas y tienen una longitud inferior a 1 m, con una abertura entre 0,1-1 mm, secas y principalmente sin relleno.

Para este macizo se establece un RMR de 57, correspondiendo a un macizo rocoso de clase III y calidad aceptable (Anexo 4). De acuerdo al criterio Bieniawski (1976), se estima una cohesión de 285 kPa y un ángulo de fricción de 33,5°.

Mediante proyección estereográfica se diferenciaron cuatro familias de discontinuidades (Fig. 26B): F1 (345/69), F2 (278/87), F3 (226/26) y F4 (58/54). El análisis geométrico y cinemático muestra que las familias F1-F3 y F2-F4, intersectan, pudiendo generar roturas en cuña. Además, puede ser factible la formación de roturas por vuelco directo y oblicuo, siendo las familias F1-F2, F1-F4 y F2-F4, teniendo como plano base F3, las susceptibles de dar este tipo de roturas.

La estación geomecánica 3 (EG-3) (Anexo 5) se encuentra en un talud con orientación general 321/38 constituido por pizarras de la Formación Serie de los Cabos, localizado cercano al mirador del faro de Busto. La resistencia de la roca matriz, tomada con un martillo Schmidt tipo L, es de 20 MPa, estimándose un grado de meteorización III (ISRM, 1989). El macizo rocoso presenta un índice $J_v = 37$, un RQD igual a 10 y un espaciado aproximado de las discontinuidades de entre 6 y 20 cm, con una longitud menor a 1 m. La abertura es inferior a 1 mm, sin relleno y completamente secas, además de tener rugosidad suave.

Para este macizo se establece un RMR de 46, correspondiendo a un macizo rocoso de clase III y calidad aceptable (Anexo 6). De acuerdo al criterio Bieniawski (1976), se estima una cohesión y ángulo de fricción de 230 kPa y 28, respectivamente.

Mediante proyección estereográfica se distinguieron cuatro familias de discontinuidades (Fig. 26C): F1 (309/60), F2 (212/84), F3 (336/87) y F4 (286/17). El análisis geométrico y cinemático efectuado muestra la posibilidad de tener roturas por vuelco directo, teniendo como plano base la familia F4. No se dan las condiciones para el roturas planares o en cuña.

La estación geomecánica 4 (EG-4) (Anexo 7) se ubica en el valle colgado, al oriente del cabo, donde afloran cuarcitas de la Formación Serie de los Cabos, en un talud de orientación general 123/46. La resistencia de la roca matriz, tomada con un martillo Schmidt tipo L, se sitúa en 75 MPa, estimándose un grado de meteorización II (ISRM, 1989). El macizo rocoso presenta un índice $J_v = 27$, un RQD de 25,9 y un espaciado medio de las discontinuidades de 6-20 cm. Su longitud es inferior a 1 m, con una abertura entre 1-5 mm, sin relleno y secas, siendo ligeramente rugosas.

Para este macizo se establece un RMR de 59, correspondiendo a un macizo de clase III, de calidad aceptable (Anexo 8). De acuerdo al criterio Bieniawski (1976), se estima una cohesión, 295 kPa, y el ángulo de fricción, 34,5°.

Mediante proyección estereográfica se diferenciaron cuatro familias de discontinuidades (Fig. 26D): F1 (322/67), F2 (210/88) y F3 (139/32). El análisis geométrico y cinemático muestra la susceptibilidad de F3 de causar roturas planares. A su vez, podrían darse roturas en cuña debido a la intersección de F2 y F3, y roturas por vuelco directo y oblicuo, estando involucradas las familias F1, F2 y F3, esta última actuando como plano base.

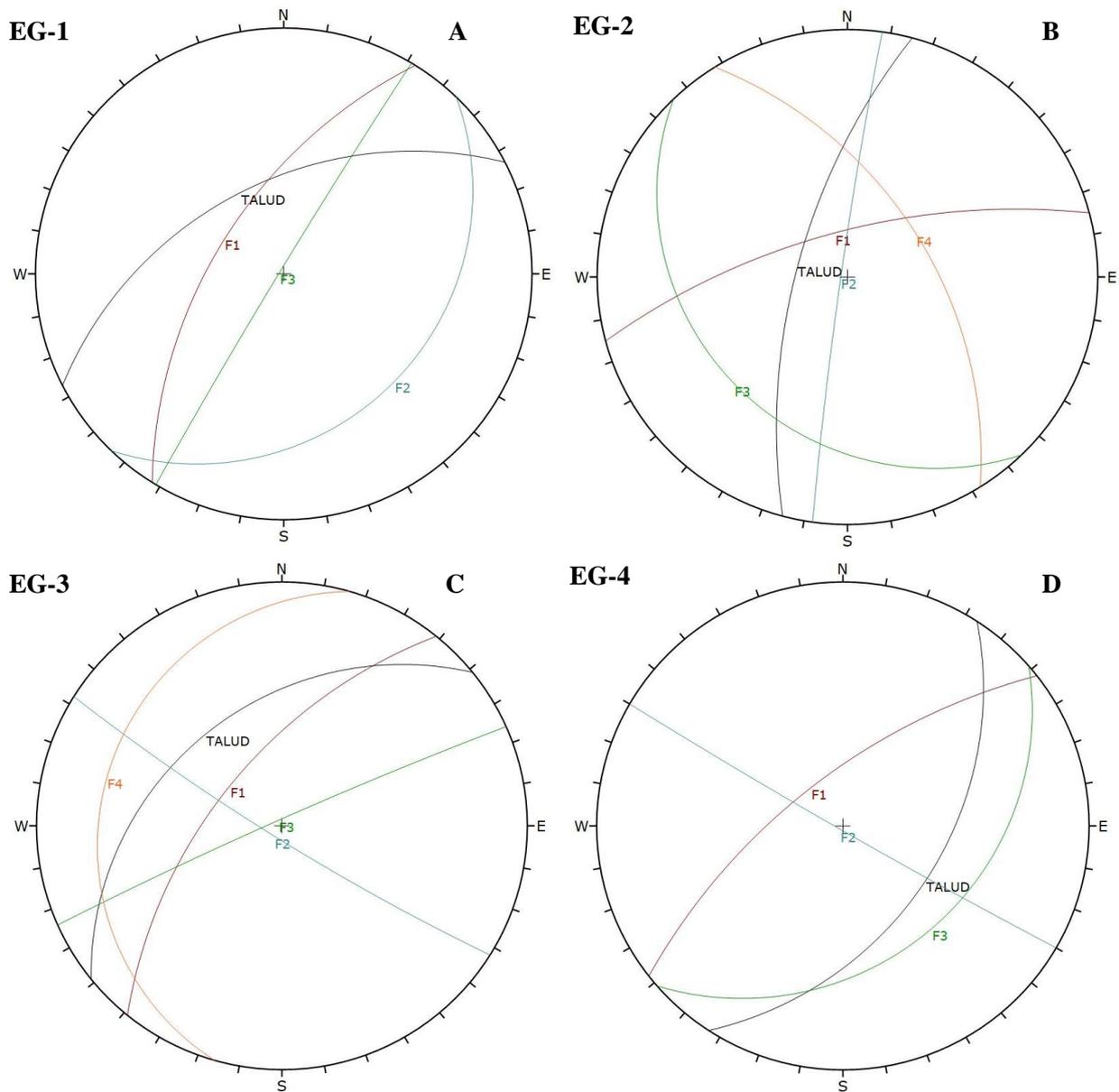


Figura 26. Principales familias de discontinuidades y orientación del acantilado en las estaciones geomecánicas.

En cuanto al método Q-slope, una vez calculado su valor, se representa en el gráfico de estabilidad de la figura 27. Este gráfico permite conocer si se trata de taludes estables,

inestables o de estabilidad incierta (Bar y Barton, 2017). En la tabla VIII se muestran los resultados del método y los datos utilizados, siendo el talud 1 (T-1), el correspondiente al acantilado donde se realizó la estación geomecánica 1.

Tabla VIII. Resultados y datos del método Q-slope

Talud	Valor Q-slope	β (°)	Estabilidad
T-1	0,381	49	Estable
T-2	0,057	67	Inestable
T-3	0,006	38	Inestable
T-4	0,151	46	Estable

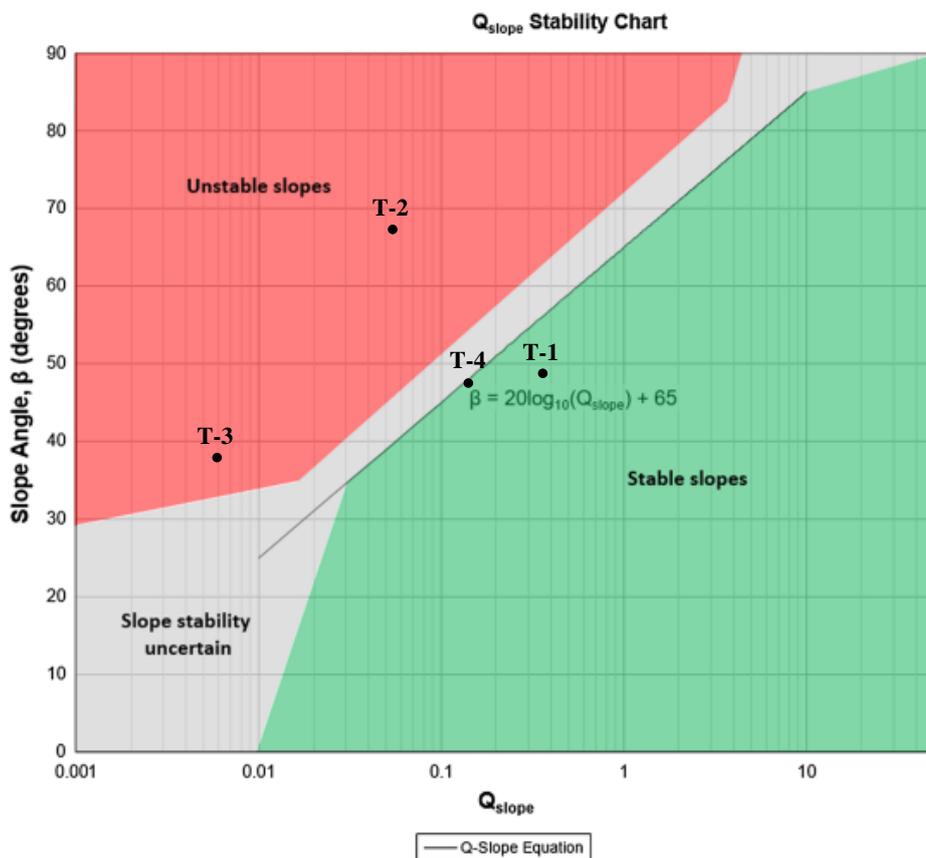


Figura 27. Gráfico de estabilidad Q-slope (Bar y Barton, 2017).

El SMR se calculó en cada estación geomecánica para cada familia de discontinuidades, considerando el menor de los valores obtenidos como el SMR del talud (Tabla IX).

En la EG-1 y EG-2, el valor SMR es igual a 69 y 68, respectivamente, otorgando a los acantilados la clase II o buena, clasificándolos como estables, pudiendo tener roturas ocasionales. Mientras los acantilados en los que se tomaron las estaciones EG-3 y EG-4 han sido clasificados con clase III o normal (SMR = 57 y SMR = 45, respectivamente), siendo parcialmente estables y propensos a roturas en algunas juntas o cuñas.

Tabla IX. SMR de las familias de discontinuidades, en color, el SMR del talud.

Estación	Familias	SMR					
		Valor	Clase	Descripción	Estabilidad	Roturas	Tratamiento
EG-1	F1	69	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F2	70	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F3	70	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
EG-2	F1	71	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F2	72	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F3	68	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F4	68	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
EG-3	F1	61	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F2	57	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
	F3	61	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F4	60	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
EG-4	F1	72	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F2	74	II	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
	F3	45	III	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático

Finalmente, en la tabla X se resumen los resultados de las tres clasificaciones geomecánicas para el conjunto de taludes.

Se puede observar que los valores RMR no presentan grandes cambios siendo acantilados de calidad estable. Mientras el método Q-slope muestra que el acantilado T-2 de la playa de Bozo es inestable, concordando con la realidad ya que se identificaron depósitos de gravedad en las cartografías y en campo. De igual modo, en la zona acantilada del mirador del faro (T-3) se clasifica como talud inestable. En cuanto al SMR, esta clasificación valora a los acantilados de Cabo Busto como buenos o normales.

Tabla X. Tabla resumen de las clasificaciones geomecánicas en cada talud.

	T-1	T-2	T-3	T-4
RMR	55	57	46	59
Calidad	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Q-slope	0,381	0,057	0,006	0,151
Valoración	Talud estable	Talud inestable	Talud inestable	Talud estable
SMR	69	68	57	45
Valoración	Buena	Buena	Normal	Normal

3.5. Modelización de caída de rocas en la playa de Bozo

En la figura 28 se puede observar el trazado de los perfiles de caída de rocas en la playa de Bozo, modelizando 500 rocas de 1.000 kg. Los perfiles se dividieron en sectores, asignando a cada uno de ellos, un tipo de material y coeficientes de restitución normal (R_n) y tangencial (R_t) (Tabla XI), parámetros seleccionados de acuerdo a los propuestos para estas litologías en la librería “*Rocscience Coefficient of Restitution Table*”.

Tabla XI. Coeficientes de restitución empleados en la modelización en función del tipo de material.

Tipo de material	Coef. de restitución normal		Coef. de restitución tangencial	
	Media	Desv. estándar	Media	Desv. estándar
Cuarcita	0,35	0,04	0,85	0,04
	Media	Desv. estándar	Media	Desv. estándar
Talud con vegetación	0,32	0,04	0,81	0,04
	Media	Desv. estándar	Media	Desv. estándar
Playa	0,5	0	0,7	0
	Media	Desv. estándar	Media	Desv. estándar

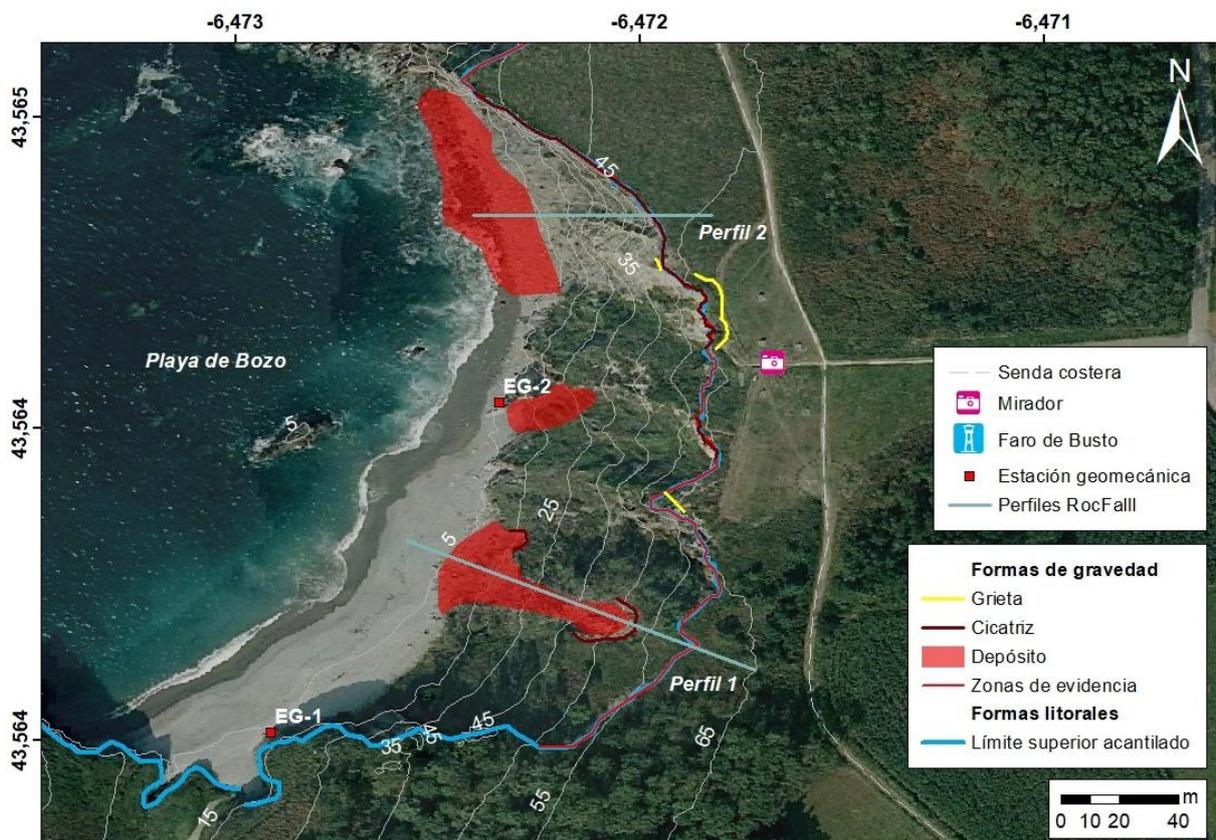


Figura 28. Trazado de los perfiles considerados en la modelización de caída de rocas y la cartografía de la playa (coordenadas geográficas en sistema sexagesimal).

A continuación, se muestran las secciones modelizadas de acantilado, así como las distintas gráficas de interés extraídas.

3.5.1. Perfil 1

El perfil 1 se ubica longitudinalmente a un movimiento en masa situado entre las estaciones 1 y 2, con una orientación NO-SE (Fig. 28) y una longitud total de 115 m. El acantilado presenta una altura de 65 m y un ángulo de buzamiento de 49°. En el mismo se distinguen tres sectores (Fig. 29): a) cuarcitas, en la parte superior, b) talud con vegetación arbustiva y arbórea, por lo que se dividió en otro sector, c) playa de gravas y cantos.

Como se puede observar en la simulación de trayectorias (Fig. 29) y las figuras 30 y 31, el 100% de las rocas llegarán a la zona de playa, entre 103,92 m y 106,16 m, siendo en el metro 103,92 donde se acumularán el 98,8% de las rocas, además de recorrer distancias que oscilan entre 65,07 m y 69,98 m. Estas partículas se desplazan principalmente por reptación, pudiendo ocasionalmente hacerlo por saltación. Tomando como referencia la base del acantilado ($x = 102$), se observa que la energía cinética de los bloques que impactan en la playa oscila entre 17,12 kJ y 24,85 kJ (Fig. 32).

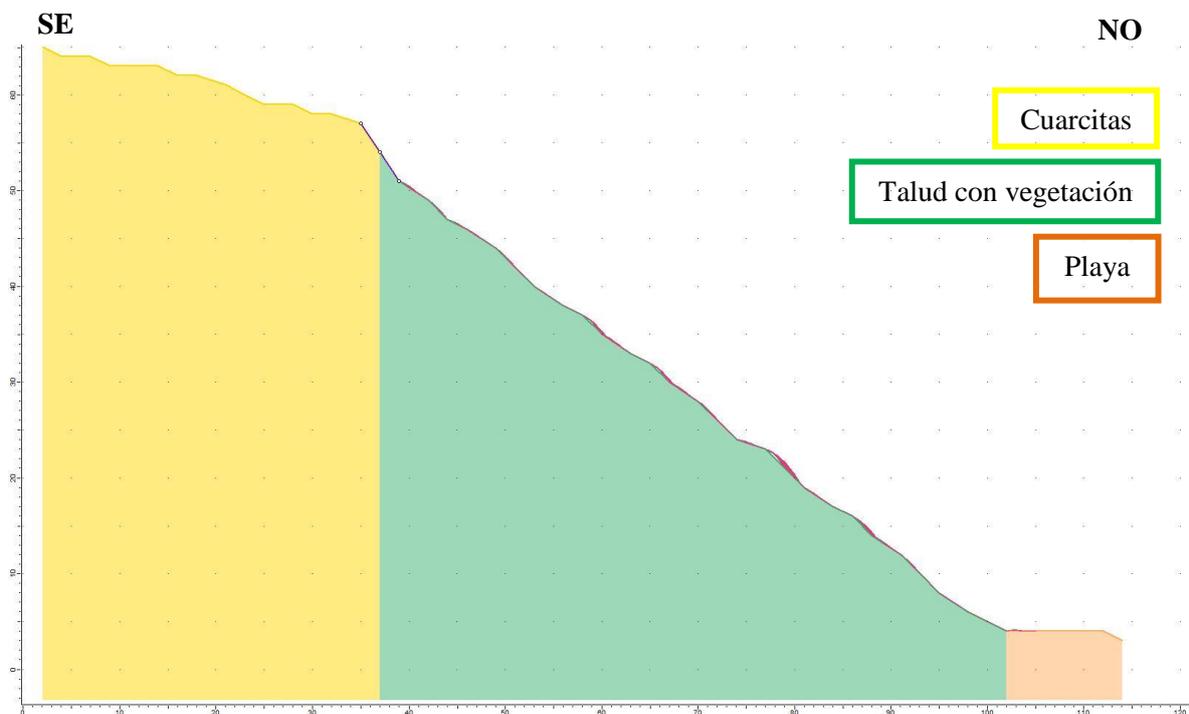


Figura 29. Simulación de trayectorias del perfil 1.

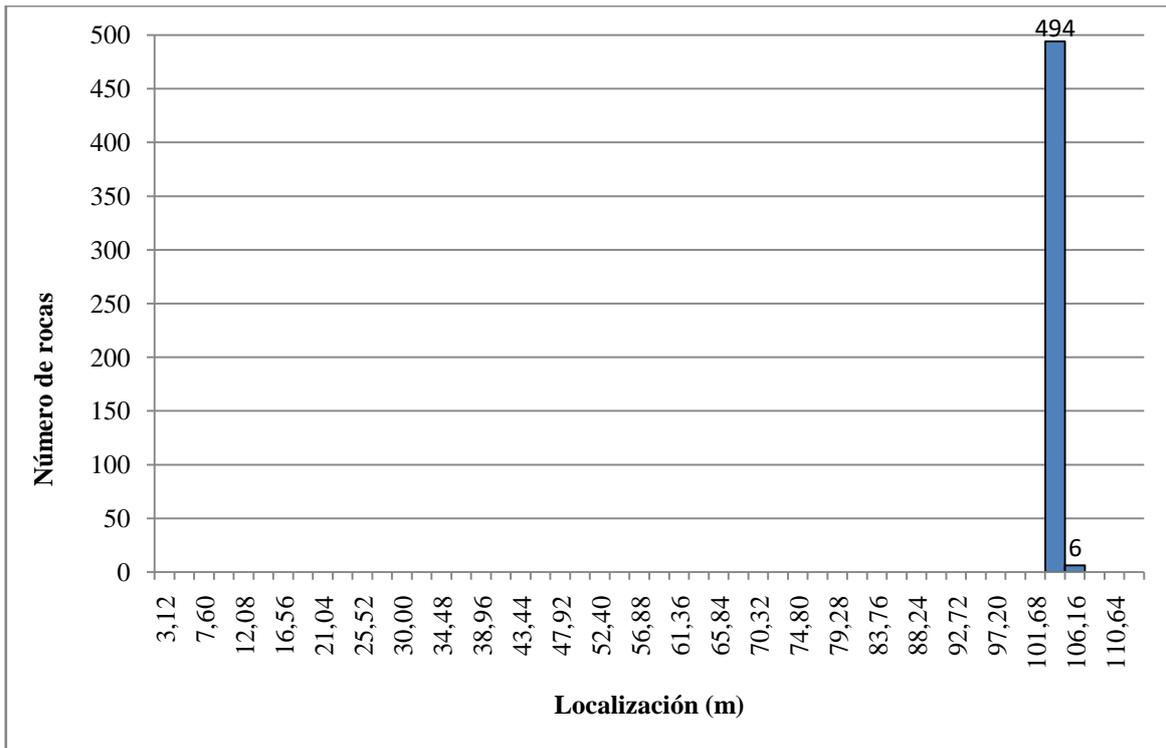


Figura 30. Distribución horizontal de la localización de las rocas de 1000 kg en el perfil 1.

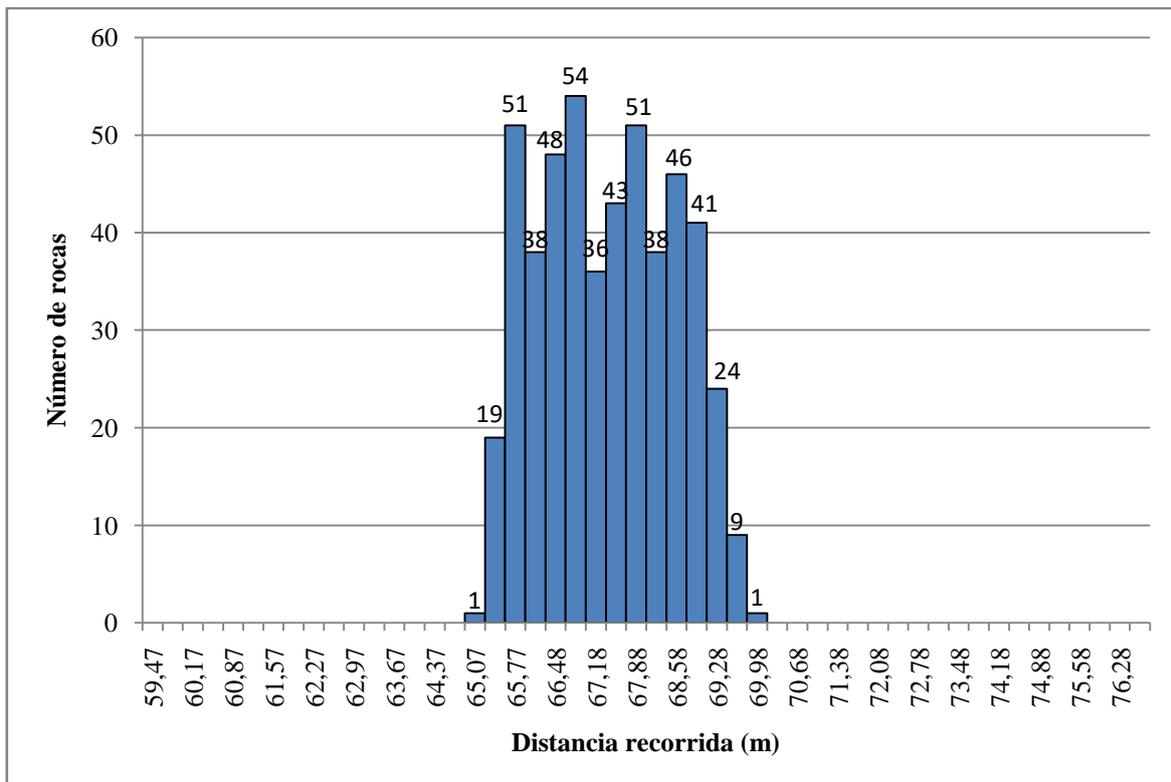


Figura 31. Distancia recorrida por las rocas de 1000 kg en el perfil 1.

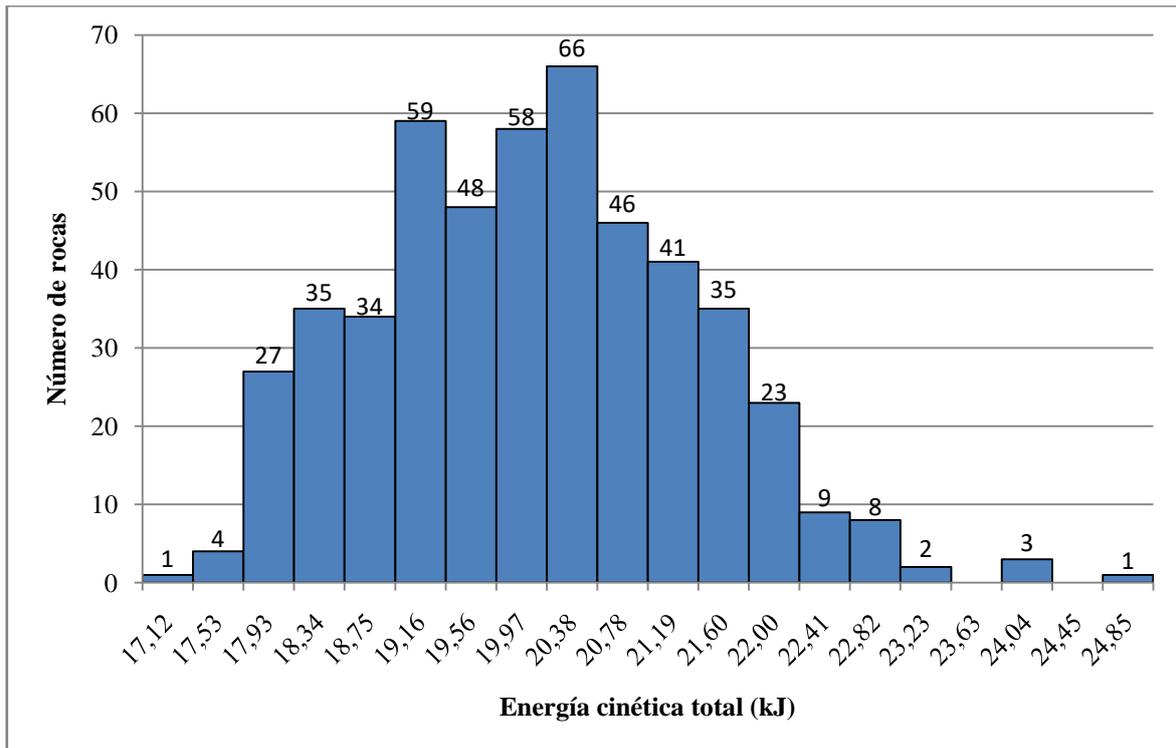


Figura 32. Distribución de la energía cinética total de las rocas al impactar en la base del acantilado.

3.5.2. Perfil 2

El perfil 2 tiene un trazado transversal al acantilado, con una orientación E-O (Fig. 28) y una longitud de 73 m. El acantilado tiene una altura de 55 m y un ángulo de buzamiento igual a 67°. Este perfil, se localiza en una zona comprometida de la playa, ya que se trata de un área dónde se encuentran grietas y cicatrices en la parte superior del acantilado, afectando a un mirador concurrido por los turistas, además de acumularse abundantes bloques en la playa. Se distinguen dos sectores (Fig. 33): a) cuarcitas, extendiéndose hasta la base del acantilado, estando el talud desprovisto de vegetación y parcialmente alterado, b) playa de gravas y cantos.

En el perfil de simulación de trayectorias (Fig. 33) se puede observar que el 100% de las rocas afectarán a la playa. Sin embargo, las partículas se depositarán en zonas superiores a 73 m (Fig. 33 y 34), ya que superan el trazado del perfil, siendo el 93% de las rocas simuladas, además de recorrer distancias que oscilan entre 37,20 m y 50,98 m (Fig. 35). Las partículas se desplazan por saltación mayoritariamente. Tomando como referencia la base del acantilado ($x = 58$), se observa que la energía cinética de los bloques que impactan en la playa oscila entre 35,69 kJ y 336,54 kJ (Fig. 36).

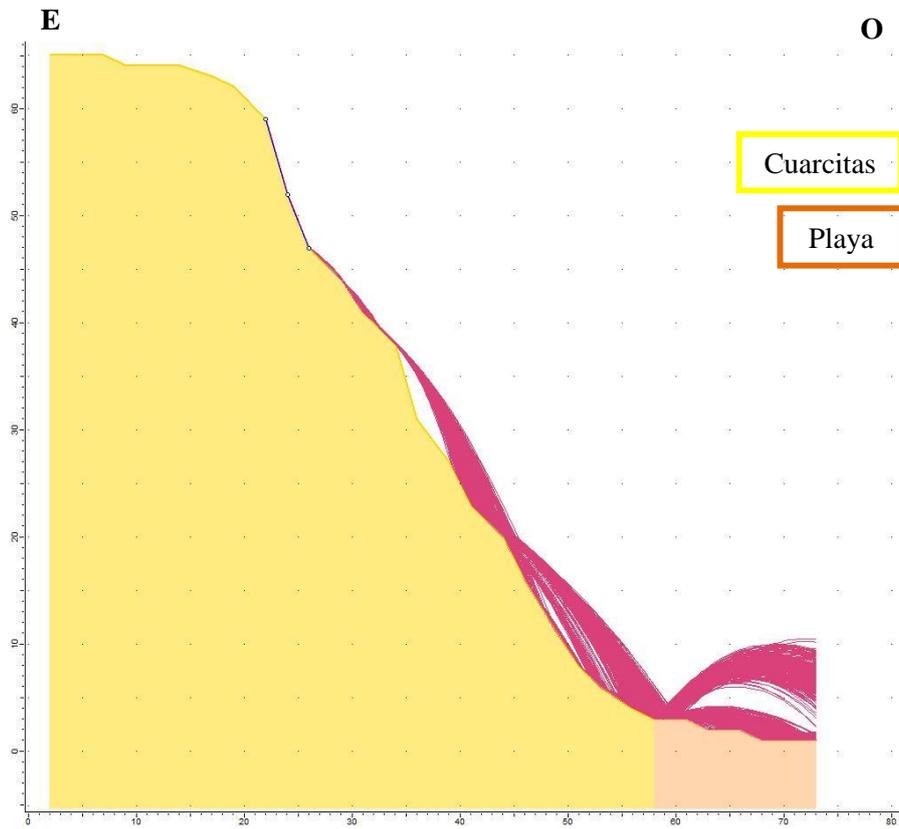


Figura 33. Simulación de trayectorias del perfil 2.

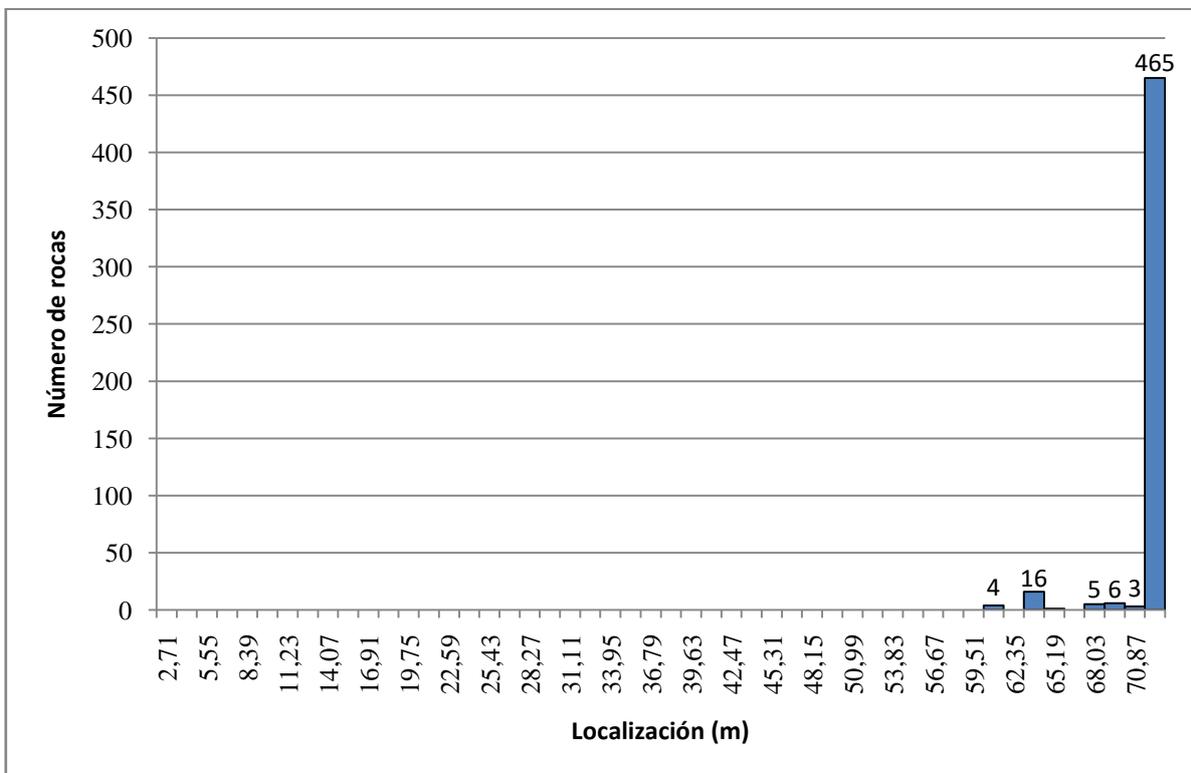


Figura 34. Distribución horizontal de la localización de las rocas de 1000 kg en el perfil 2.

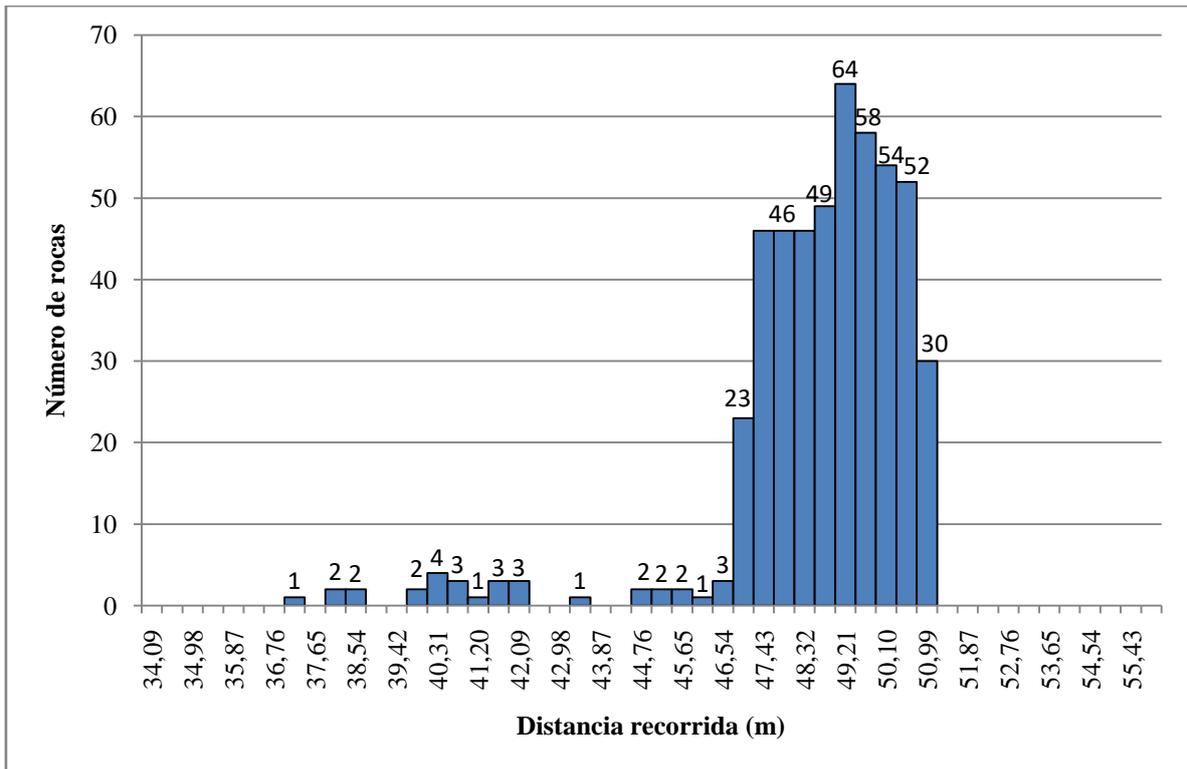


Figura 35. Distancia recorrida por las rocas de 1000 kg en el perfil 2.

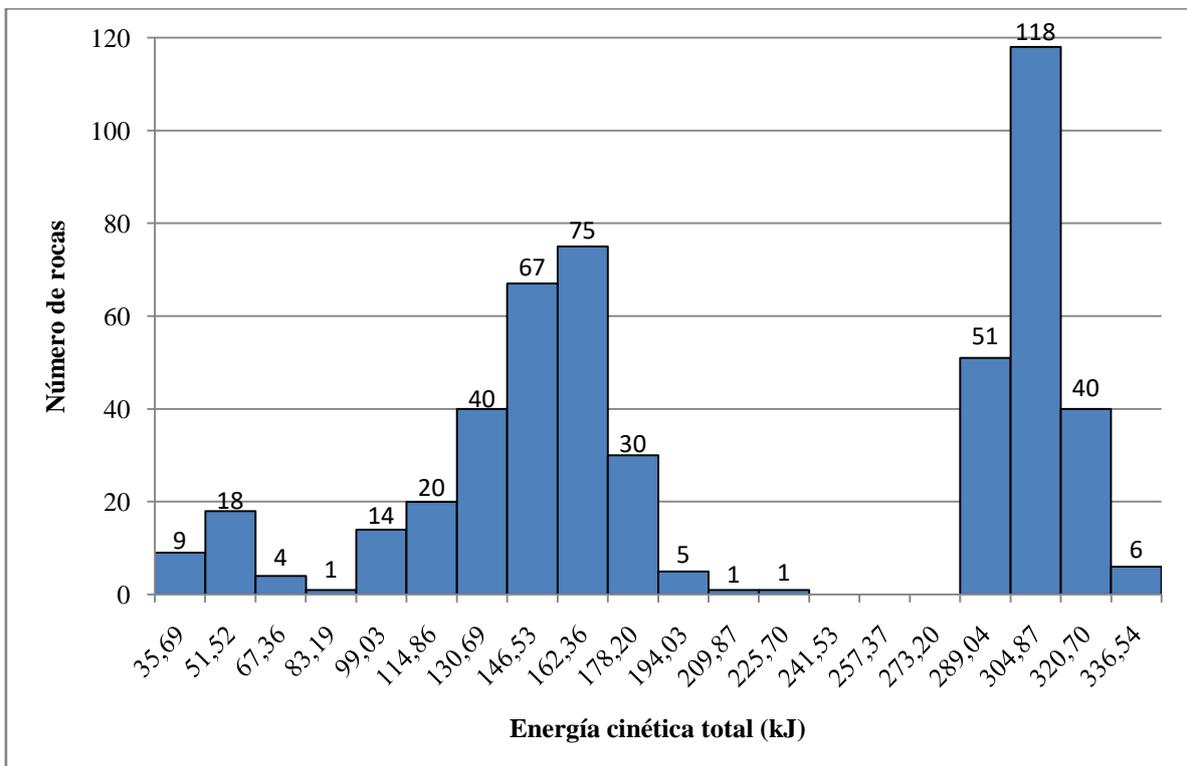


Figura 36. Distribución de la energía cinética total de las rocas al impactar en la base del acantilado.

3.6. Zonificación de la senda costera

A partir de la información aportada por los modelos digitales del terreno (Fig. 9, 10 y 11), la cartografía geomorfológica (Fig. 15) y de vegetación (Anexo 18), así como las modelizaciones de caída de rocas y simulación de trayectorias (Fig. 29 y 33) de la zona de estudio, se ha podido evaluar la susceptibilidad ante los procesos de caída de rocas.

Las figuras 37 y 38 recogen, respectivamente, el mapa de susceptibilidad orientada a caída de rocas para la totalidad de los acantilados de la zona de estudio y el del propio trazado de la senda, clasificando en las cinco categorías de susceptibilidad descritas en la metodología.

Las zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de caída de rocas se sitúan cercanas al límite superior del acantilado, en altitudes entre 45 y 60 m, pudiendo encontrarse también, en elevaciones entre 60 y 75 m, como ocurre en la playa de Bozo. Estas zonas estarían marcadas por pendientes abruptas de 60 a 90°, y cuyos acantilados se encuentren orientados al suroeste en el sector occidental, y norte en el sector central del cabo. Otro aspecto, estaría dado por la vegetación, siendo los acantilados sin vegetación o con vegetación halófila, normalmente escasa, los más propensos a desprendimientos.

Las áreas con mayor probabilidad de tener procesos de gravedad se encuentran a escasa distancia de la senda, un mínimo de 4 m y un máximo de 10 m, en las zonas en las que la senda circula próxima al acantilado, por lo que si se generasen podrían afectar a su trazado. A su vez, los miradores, que son las zonas más visitadas, podrían resultar dañados al situarse en áreas de muy alta probabilidad de ocurrencia de desprendimientos, en especial el mirador de la playa de Bozo.

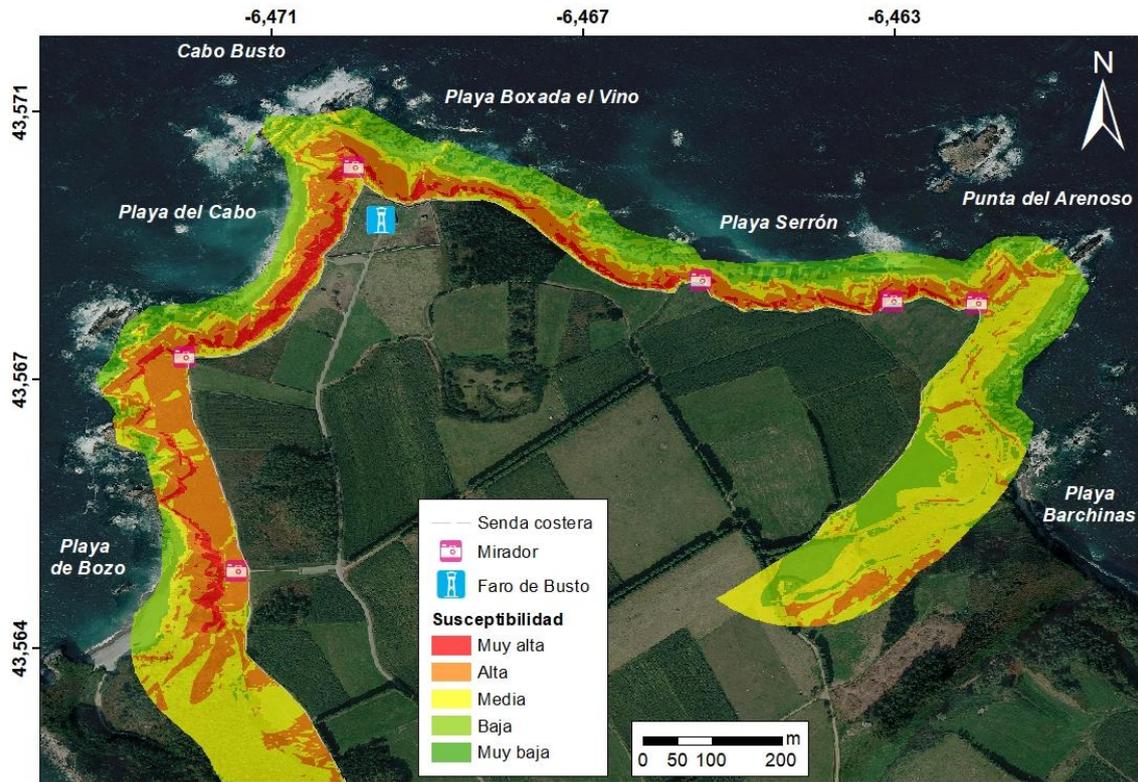


Figura 37. Mapa de susceptibilidad por procesos de caída de rocas en los acantilados por el que transcurre la senda costera de Cabo Busto.

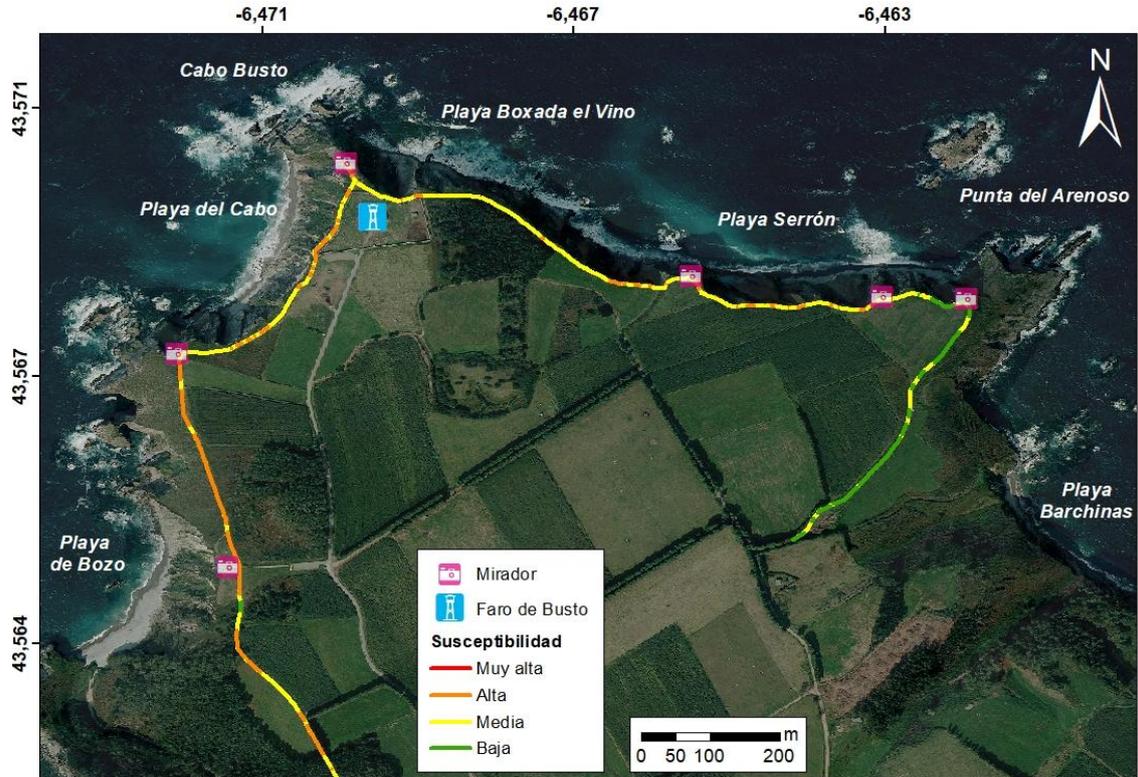


Figura 38. Zonificación de la susceptibilidad por procesos de gravedad de la senda costera PR-AS4 en el entorno de Cabo Busto.

4. CONCLUSIONES

El estudio geomorfológico/geotécnico llevado a cabo en los acantilados por los que transcurren los 1,63 km estudiados de la senda costera PR-AS4, situada en Cabo Busto (Valdés, Asturias), ha permitido evaluar su estabilidad general. Así, se caracterizó geomorfológicamente el entorno de la senda costera, se identificaron y caracterizaron los procesos de gravedad que afectan a la zona, se modelizó la caída de rocas en la playa de Bozo y se estableció una zonificación de la susceptibilidad de la senda costera. A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones.

El sustrato de Cabo Busto está constituido por cuarcitas y pizarras de la Formación Serie de los Cabos. Situados discordantemente se encuentran depósitos de arenas y cantos, evidenciando una superficie de rasa, situada entre 64,5 y 68,2 m de altura con una pendiente de 4°. Además, se definieron dos valles colgados al este del cabo, teniendo una anchura media de 100 m y longitudes de 260 m, el menor, y 410 m el valle mayor. El punto de desagüe se estimó a 25 m.s.n.m.

Estas litologías que componen los acantilados se encuentran involucradas en diferentes procesos de gravedad, que han sido recogidos en una cartografía de inestabilidades correspondiente al año 2022. Además, se han identificado grietas dispuestas subverticalmente con aberturas máximas entre 25 y 30 cm que afectan al trazado de la senda costera.

El análisis de las ortofotografías de los años 2006, 2009, 2011, 2014 y 2020 ha permitido identificar una intensa actividad de los acantilados de la zona a lo largo del siglo XXI, observándose una mayor actividad en el año 2014.

La clasificación geomecánica del macizo rocoso muestra una calidad aceptable, según el RMR, y una valoración buena, para los acantilados de la playa de Bozo, y normal para el resto de acantilados estudiados, en base al SMR. A su vez el método Q-slope valora como taludes inestables los localizados en la playa de Bozo y en el mirador del faro.

Los potenciales mecanismos de inestabilidad están favorecidos por la distribución de familias de discontinuidades, generándose roturas en cuña y/o vuelco, observándose mayor número de movimientos en el sector occidental, debido a la incidencia de los temporales del Noroeste. La modelización de trayectorias que simula los bloques desprendidos en la playa de Bozo ha permitido conocer que esta zona es potencialmente peligrosa, por caída de cuñas desprendidas, pudiendo estimar su localización, distancia recorrida y energía cinética con la que lo hacen.

El mapa de susceptibilidad obtenido ha permitido delimitar las áreas donde es más probable que sucedan fenómenos de gravedad. El trazado de la senda costera próximo al acantilado presenta, en su mayoría, susceptibilidad media, encontrando 4,2 m de susceptibilidad muy alta, localizada en las zonas circundantes a los miradores, y 701,5 m de

susceptibilidad alta, pudiendo verse afectada por los procesos descritos. Sería recomendable que los usuarios de dicha senda estuvieran informados de ello.

5. REFERENCIAS

AEMET. Agencia Espacial de Meteorología (s.f) [online]. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima

Álvarez-Marrón, J., Hetzel, R., Niedermann, S., Menéndez, R., Marquínez, J., 2008. Origin, structure and exposure history of a wave-cut platform more than 1 Ma age at the coast of northern Spain: a multiple cosmogenic nuclide approach. *Geomorphology*93, 316–334.

Alonso Alonso, P. (2020). Evolución de los acantilados del sector de Luarca en relación con los temporales de ola [*Trabajo Fin de Máster, Universidad de Oviedo*].

Arruñada, A. (28/05/2020). *Alertan de varios desprendimientos en la playa de Bozo y el mirador del Tiro*. EL COMERCIO. Disponible en: <https://www.elcomercio.es/asturias/occidente/alertan-varios-desprendimientos-20200528001055-ntvo.html>

Asensio, J. A. R. (1995). EXCAVACIONES ARQUEOLOGICAS EN CABO BUSTO (VALDES) UN ASENTAMIENTO ACHELENSE. In *Excavaciones arqueológicas en Asturias: 1991-94* (pp. 7-18). Servicio de Publicaciones.

Ayday, C., and Goktan, R. M. (1992). Correlations between L and N-type Schmidt hammer rebound values obtained during field testing. In *ISRM symposium: Eurock'92* (pp. 47-50).

Bar, N., and Barton, N. (2017). The Q-slope method for rock slope engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(12), 3307-3322.

Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.

Aller, J., Bastida, F., y Bobillo-Ares, N. C. (2016). Mecanismos para la formación de foliaciones tectónicas superpuestas a pliegues: ejemplos en el orógeno varisco del NW de España Mechanisms for the formation of tectonic foliations superimposed on folds: examples in the Variscan. *Trabajos de Geología*, (36), 27-44.

Bienawski, Z. T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Camino Mayor, J. (1995): *Los castros marítimos en Asturias*. RIDEA. 256 pp.

Domínguez-Cuesta, M. J., Ferrer Serrano, A., Rodríguez Rodríguez, L., López-Fernández, C., & Jiménez-Sánchez, M. (2020). Análisis del retroceso de la costa cantábrica en el entorno del Cabo Peñas (Asturias, N España).

Domínguez-Cuesta, M. J., González-Pumariega, P., Valenzuela, P., López-Fernández, C., Rodríguez-Rodríguez, L., Ballesteros, D. and Jiménez-Sánchez, M. (2022). Understanding the retreat of the Jurassic Cantabrian coast (N. Spain): Comprehensive monitoring and 4D evolution model of the Tazones Lighthouse landslide. *Marine Geology*, 106836.

Domínguez-Cuesta, M.J., Valenzuela, P., Rodríguez-Rodríguez, L., Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Piñuela, L., García-Ramos, J.C. (2019): Cliff coast of Asturias. In: (Morales, J.A., Ed.) *The Spanish coastal systems. Dynamic processes, sediments and management*. Springer. Pp 49-77. ISBN 978-3-319-93169-2. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_3

Farias, P., Gallastegui, G., González-Lodeiro, F., Marquínez, J., Martín Parra, L. M., Martínez Catalán, J. R., Pablo-Maciá, J. G. y L. R. Rodríguez Fernández (1987): Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de Galicia Central. *Ann. Fac. Cienc. Univ. Porto*, 1: 411-431.

Farias Arquer, P., López Fernández, C., Valderrábano Luque, J., y Gallastegui Suárez, J. (2008). La costa occidental asturiana. 65 pp.

Federación de Deportes de Montaña, Escalada y Senderismo del Principado de Asturias (s.f.). *Senderos de Pequeño Recorrido, PR-AS4/Cabo de Busto* [online]. Disponible en: <https://fempa.net/senderos/senderos-pr>

Flor-Blanco, G., Bruschi, V., Adrados, L., Domínguez-Cuesta, M. J., Gracia-Prieto, F. J., Llana-Fúnez, S., & Flor, G. (2022). Geomorphological evolution of the calcareous coastal cliffs in North Iberia (Asturias and Cantabria regions). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 273, 107913.

Flor, G., Flor-Blanco, G., & Ruanova, M. R. (2022). Transferencias arenosas transversales y longitudinales entre playas apoyadas y dunas asociadas en la costa de Asturias (NO de la península Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 35(1), 15-35.

Flor G. (1983). Las rasas asturianas: ensayo de correlación y emplazamiento. *Trabajos de Geología* 13: 65-81.

Flor Blanco, G., Camblor, C. (1989). Características dinámicas y sedimentológicas del estuario de Ribadesella (Asturias, N de España). *Trabajos de Geología*. Oviedo. 18: 13-36.

Flor, G. y Flor-Blanco, G., (2014). Raised Beaches in the Cantabrian Coast. In: Gutierrez F., Gutierrez M. (eds) *Landscapes and Landforms of Spain. World Geomorphological Landscapes*. Springer, Dordrecht. 239-248.

Flor Rodríguez, G. S., Flor Blanco, G., & Flores Soriano, C. (2014). Cambios ambientales por los temporales de invierno de 2014 en la costa asturiana (NO de España). *Trabajos de Geología*.

Fonseca, M. A. N. (2013). Sondeos arqueológicos en la charca de Cabo Busto, Valdés: Dos momentos de la ocupación humana más antigua en la región. In *Excavaciones arqueológicas en Asturias 2007-2012: en el centenario del descubrimiento de la caverna de la peña de Candamo* (pp. 369-372). Gobierno del Principado de Asturias. Consejería de Educación, Cultura y Deporte.

García Couto, M.A., 2011. Iberian Climate Atlas. AEMET (España) and Instituto de Meteorología (Portugal), Madrid.

Gobierno del Principado de Asturias (s.f.). *Yacimientos Arqueológicos de Asturias* [online]. Disponible en: <https://yacimientos.asturias.es/el-patrimonio-arqueol%C3%B3gico>

González Menéndez, L., Heredia, N. y Marcos, A. (2008). Mapa Geológico Digital Continuo E. 1: 50.000, Zona Asturoccidental-Leonesa (Zona-1100). in GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España.[en línea]. Disponible en: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1100>

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (Vol. 2, pp. 221-388). New York: Wiley.

Instituto Geológico y Minero de España (31/12/1985). *Rasa de Cabo Busto*[online]. Disponible en: <http://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=AL035#geomorfologia>

ISRM. (1981). Rock characterization, testing and monitoring. *ISRM suggested methods*, 211.

Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y L. Conde (1972): Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares, E: 1:1.000.000. Instituto Geológico y Minero de España, 113 pp.

López-Fernández, C., Llana-Fúnez, S., Fernández-Viejo, G., Domínguez-Cuesta, M.J., Díaz-Díaz, L.M. (2020): Comprehensive characterization of elevated coastal platforms in the North Iberian margin: a new template to quantify uplift rates and tectonic patterns. *Geomorphology*, 364. 13 pp. ISSN: 0169-555X.

Lotze, F. (1945): Zur Gliederung der Variszden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch*, 6: 78-92.

Lozano, A. (2009). Martillo Schmidt (Esclerómetro). *Geoengineering Services & Consulting EIRL*, 4.

Mary, G. (1983). Evolución del margen costero de la Cordillera Cantábrica en Asturias desde el Mioceno. *Trabajos de Geología*, 13, Univ. Oviedo, 3-35.

Marcos A., Arboleya M.L. (1976). Mapa geológico de la Hoja nº 12 (11-3) (Busto). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA). Primera edición. IGME.

Martínez Catalán, J.R., R. Arenas, F. Díaz García, F.J. Rubio Pascual, J. Abati and J. Marquínez (1996): Variscan exhumation of a subducted Paleozoic continental margin: The basal units of the Ordenes Complex, Galicia, NW Spain. *Tectonics*, 15: 106-121.

Pérez Estaún, A., Bastida, F., Alonso, J.L., Marquínez, J., Aller, J., Álvarez Marrón, J., Marcos, A., Pulgar, J.A., 1988. A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrustbelt: the Cantabrian Zone. *Tectonics*, 7: 517-538.

Markland, J. T. (1972). *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected*. Interdepartmental Rock Mechanics Project, Imperial College of Science and Technology.

Miller, R. P. (1965). *Engineering classification and index properties for intact rock*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Naturaleza de Asturias (s.f.). *Espacios Naturales Protegidos. Gobierno del Principado de Asturias* [online]. Disponible en: <https://naturalezadeasturias.es/espacios/accede/natura2000/ZEC-ES1200055.html>

Plata Torres, J. L. (2009). Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1: 50.000.

Principado de Asturias (s.f.). *Yacimientos Arqueológicos de Asturias* [online]. Disponible en: <https://yacimientos.asturias.es/mapa-web>

Romana, M. (1997). Clasificación SMR para Taludes. In *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Granada.

Turismo Asturias (s.f.). *Ruta Cabo Busto* [online]. Disponible en: <https://www.turismoasturias.es/descubre/naturaleza/rutas/senderismo/cabo-busto>

Universidad de Oviedo (s.f.). *Base de datos de argayos del Principado de Asturias* [online]. Disponible en: www.geol.uniovi.es/BAPA

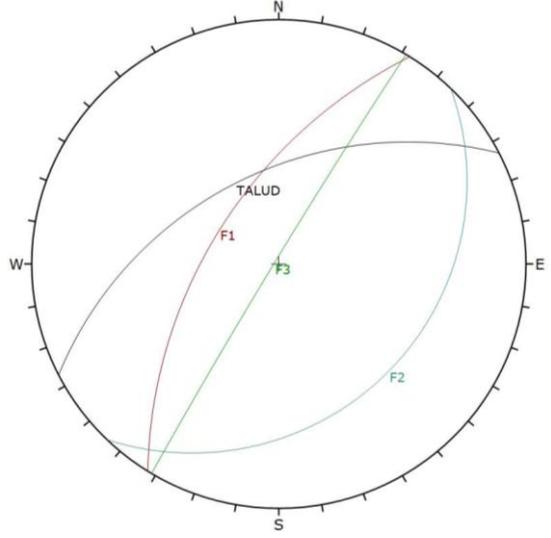
Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M. J., García, M. A. M., & Jiménez-Sánchez, M. (2017). A spatio-temporal landslide inventory for the NW of Spain: BAPA database. *Geomorphology*, 293, 11-23.

Varnes, D. J. (1978). Slope movements and types and processes. In: *Landslides: Analysis and Control*, Transportation Res. Board Nat. Ac. Sci. Washington Spec. Rep., 176: 11-13.

Young, A.P., Carilli, J.E., 2019. Global distribution of coastal cliffs. *Earth Surf. Process. Landforms* 44 (6), 1309–1316.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de la estación geomecánica 1

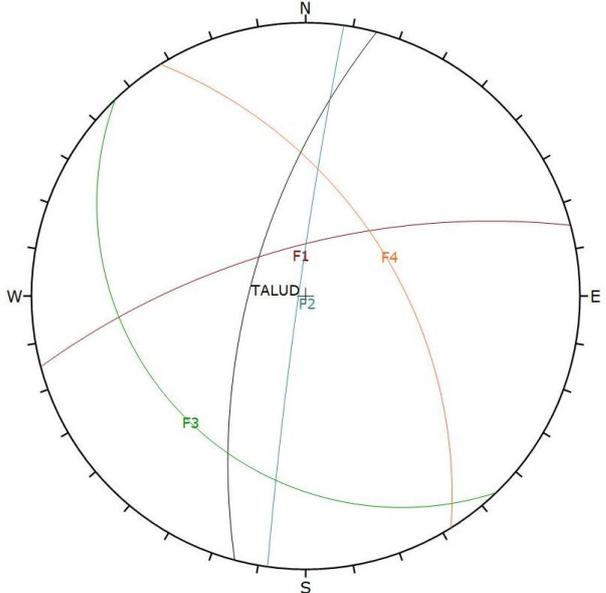
FICHA ESTACIÓN GEOMECÁNICA	PROYECTO: TFM Cabo Busto						
	FECHA: 11/11/2022						
	COORDENADAS: 43.5634, -6.4730						
	ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-1						
LITOLOGÍA	Cuarzitas						
FORMACIÓN	Serie de los Cabos						
ESTRUCTURA	Sin estructuras						
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremad. Blanda (Uña) 0	Muyblanda (Navaja) 1	Blanda (puntamartillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martillo) 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL	
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	42 66 44 68 62 60 61 62 56 62		OBSERVACIONES: occidente de la playa.				
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA			
							

Anexo 2. RMR en la estación geomecánica 1

RMR		PROYECTO: TFM Cabo Busto							
		FECHA: 11/11/2022							
		COORDENADAS: 43.5634, -6.4730							
		ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-1							
Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia roca matriz	Carga puntual	>10MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	>250MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Valor	20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidades	>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	6-20cm	<6cm			
	Valor	20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando <5mm	Blando >5mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Alteración moderada	Muy alterada	Descompuesta		
Valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Anexo 3. Datos de la estación geomecánica 2

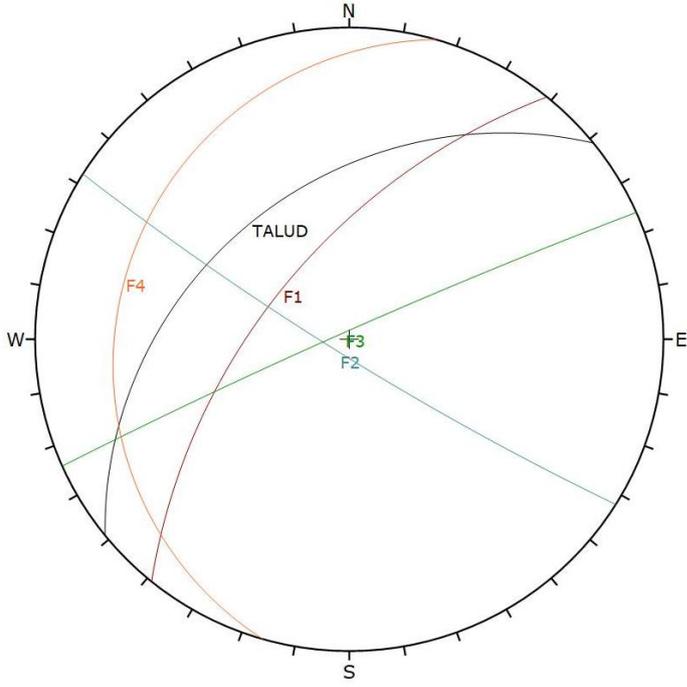
FICHA ESTACIÓN GEOMECÁNICA	PROYECTO: TFM Cabo Busto						
	FECHA: 11/11/2022						
	COORDENADAS: 43.5646, -6.4722						
	ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-2						
LITOLOGÍA	Cuarzitas						
FORMACIÓN	Serie de los Cabos						
ESTRUCTURA	Sin estructuras						
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremad. Blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (puntamartillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martillo) 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL	
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	72 71 66 70 72 71 74 68 72 69			OBSERVACIONES: oriente de la playa, donde se localizan procesos de gravedad.			
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA			
							

Anexo 4. RMR en la estación geomecánica 2

RMR		PROYECTO: TFM Cabo Busto							
		FECHA: 11/11/2022							
		COORDENADAS:43.5646, -6.4722							
		ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-2							
Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia roca matriz	Carga puntual	>10MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	>250MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Valor	20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidades	>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	6-20cm	<6cm			
	Valor	20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando <5mm	Blando >5mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Alteración moderada	Muy alterada	Descompuesta		
Valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Anexo 5. Datos de la estación geomecánica 3

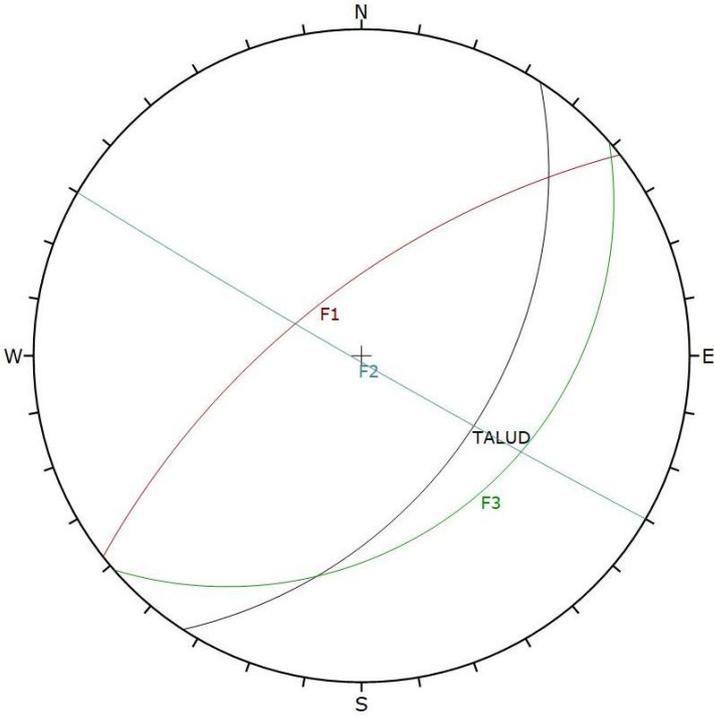
FICHA ESTACIÓN GEOMECÁNICA	PROYECTO:TFM Cabo Busto						
	FECHA:11/11/2022						
	COORDENADAS:43.5700, -6.4700						
	ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-3						
LITOLOGÍA	Pizarras						
FORMACIÓN	Serie de los Cabos						
ESTRUCTURA	Sin estructuras						
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremad. Blanda (Uña) 0	Muyblanda (Navaja) 1	Blanda (puntamartillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martillo) 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL	
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	14 12 18 18 26 12 16 12 13 18		OBSERVACIONES: mala calidad de afloramiento, faro del cabo.				
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA			
							

Anexo 6. RMR en la estación geomecánica 3

RMR		PROYECTO: TFM Cabo Busto							
		FECHA: 11/11/2022							
		COORDENADAS:43.5700, -6.4700							
		ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-3							
Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia roca matriz	Carga puntual	>10MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	>250MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Valor	20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidades	>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	6-20cm	<6cm			
	Valor	20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando <5mm	Blando >5mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Alteración moderada	Muy alterada	Descompuesta		
Valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Anexo 7. Datos de la estación geomecánica 4

FICHA ESTACIÓN GEOMECÁNICA	PROYECTO:TFM Cabo Busto						
	FECHA: 12/11/2022						
	COORDENADAS: 43.5657, -6.4617						
	ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-4						
LITOLOGÍA	Cuarzitas						
FORMACIÓN	Serie de los Cabos						
ESTRUCTURA	Sin estructuras						
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños > 30	Muy brechificado > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremad. Blanda (Una) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (puntamartillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremadam. Dura (Sólo raya con martillo) 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada		III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual
HIDROGEOLOGÍA	Sin agua		Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	40 59 60 54 36 46 42 49 56 56			OBSERVACIONES:			
FOTOGRAFÍA				PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA			
							

Anexo 8. RMR en la estación geomecánica 4

RMR		PROYECTO: TFM Cabo Busto							
		FECHA: 12/11/2022							
		COORDENADAS:43,5657, -6,4617							
		ESTACIÓN GEOMECÁNICA: EG-4							
Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia roca matriz	Carga puntual	>10MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	>250MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Valor	20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidades	>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	6-20cm	<6cm			
	Valor	20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando <5mm	Blando >5mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Alteración moderada	Muy alterada	Descompuesta		
Valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		Valor	15	10	7	4	0		

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Mala
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Anexo 9. Tablas de estimación de los parámetros RQD, J_n, J_r, J_a, O factor, J_w y SRF usados en la fórmula Q-slope

Table 1 Rock quality designation

Rock quality designation	description	RQD (%) ^a
A	Very poor	0–25
B	Poor	25–50
C	Fair	50–75
D	Good	75–90
E	Excellent	90–100

^a where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including zero), a nominal value of 10 is used to evaluate Q-slope. RQD intervals of 5, i.e., 100, 95, 90, etc., are sufficiently accurate

Table 2 Joint set number

Joint set number description	J _n	
A	Massive, no or few joints	0.5–1
B	One joint set	2
C	One joint set plus random joints	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random joints	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random joints	12
H	Four or more joint sets, random, heavily jointed	15
J	Crushed rock, earthlike	20

Joint roughness number description	J _r	
<i>(a) Rock-wall contact, (b) contact after shearing</i>		
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough or irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1.0
G	Slickensided, planar	0.5
<i>(c) No rock-wall contact when sheared</i>		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact.	1.0
J	Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock-wall contact.	1.0

Descriptions refer to small-scale features and intermediate scale features, in that order

Add 1.0 if mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m

J_r = 0.5 can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented for minimum strength

J_r and J_n classification are applied to the discontinuity set or sets that are least favorable for stability both from the point of view of orientation and shear resistance τ , where $\tau \approx \sigma_n \tan^{-1} (J_r/J_n)$

Table 4 Joint alteration number

Joint alteration number description	J _a	
<i>(a) Rock-wall contact (no clay fillings, only coatings)</i>		
A	Tightly healed, hard non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote	0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only	1.0
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0
D	Silty- or sandy-clay coatings, small clay disintegrated rock, etc.	3.0
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talc, gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays	4.0
<i>(b) Rock-wall contact after some shearing (thin clay fillings, probable thickness $\approx 1-5$ mm)</i>		
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	4.0
G	Strongly over-consolidated non-softening clay mineral fillings	6.0
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings	8.0
J	Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite. Value of J _a depends on percent of swelling clay-size particles and access to water	8–12
<i>(c) No rock-wall contact when sheared (thick clay/crushed rock fillings)</i>		
M	Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H, J for description of clay condition)	6, 8, or 8–12
N	Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction (non-softening)	5.0
OPR	Thick, continuous zones or bands of clay (see G, H, J for description of clay condition)	10, 13, or 13–20

Table 5 Discontinuity orientation factor—O-factor

O-factor description	Set A	Set B
Very favorably oriented	2.0	1.5
Quite favorable	1.0	1.0
Unfavorable	0.75	0.9
Very unfavorable	0.50	0.8
Causing failure if unsupported	0.25	0.5

Table 6 Environmental and geological condition number

J_{wice}^a	Desert environment	Wet environment	Tropical storms	Ice wedging
Stable structure; competent rock	1.0	0.7	0.5	0.9
Stable structure; incompetent rock	0.7	0.6	0.3	0.5
Unstable structure; competent rock	0.8	0.5	0.1	0.3
Unstable structure; incompetent rock	0.5	0.3	0.05	0.2

^a When drainage measures are installed, apply $J_{\text{wice}} \times 1.5$, when slope reinforcement measures are installed, apply $J_{\text{wice}} \times 1.3$, and when drainage and reinforcement are installed, apply both factors $J_{\text{wice}} \times 1.5 \times 1.3$

Table 7 SRF_a physical condition

Description	SRF _a
A Slight loosening due to surface location, disturbance from blasting or excavation	2.5
B Loose blocks, signs of tension cracks and joint shearing, susceptibility to weathering, severe disturbance from blasting	5
C As B, but strong susceptibility to weathering	10
D Slope is in advanced stage of erosion and loosening due to periodic erosion by water and/or ice-wedging effects	15
E Residual slope with significant transport of material downslope	20

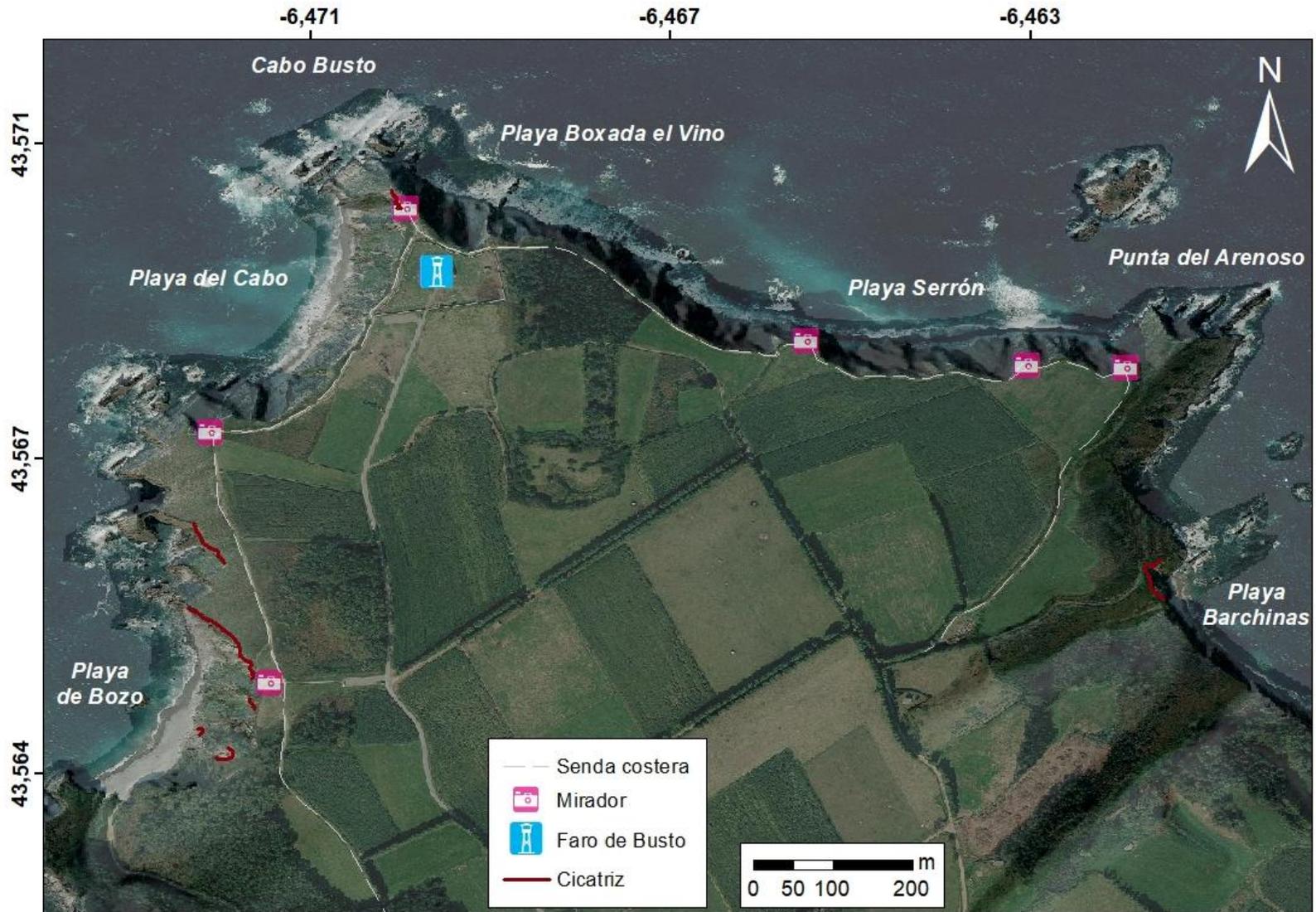
Anexo 10. Clasificación SMR para taludes (Romana, 1997)

Factores de ajuste por la orientación de las juntas (F_1, F_2 y F_3)						
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P T	$ \alpha_j - \alpha_x $ $ \alpha_j - \alpha_x - 180^\circ $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
P/T	F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	F_2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F_2	1	1	1	1	1
P T	$\beta_j - \beta_x$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0 - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
	$\beta_j + \beta_x$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	—	—
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60
Factor de ajuste por el método de excavación (F_4)						
Método	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o excavación mecánica	Voladura deficiente	
F_4	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8	
Clases de estabilidad						
Clase	V	IV	III	II	I	
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 40	61 - 80	81 - 100	
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna	
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno	
P: rotura plana α_x : dirección del talud β_x : buzamiento del talud T: rotura por vuelco α_j : dirección de las juntas β_j : buzamiento de las juntas						

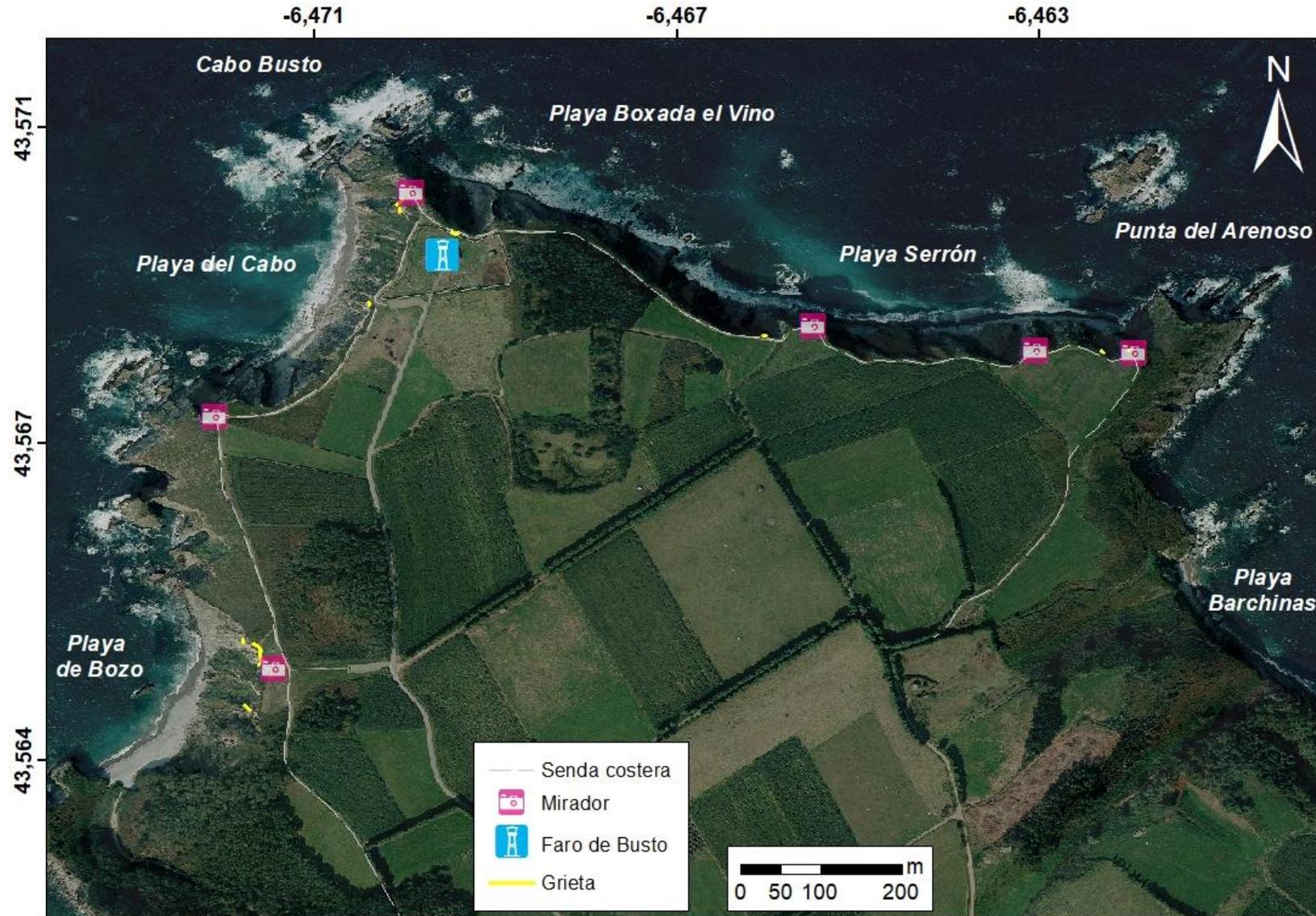
Anexo 11. Roturas probables y métodos de soporte sugeridos para valores SMR (Romana, 1997)

Table 4 PROBABLE FAILURES ACCORDING SMR VALUES																
PLANE FAILURE	VERY BIG					MAJOR					NONE					
WEDGE FAILURE						MANY					SOME					
TOPPLING						MAJOR					MINOR					
MASS FAILURE	POSSIBLE										NONE					
SMR →	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
REEXCAVACIÓN	REEXCAVATION WALLS															
DRAINAGE	SURFACE DRAINAGE DEEP DRAINAGE															
CONCRETE	SHOTCRETE DENTAL CONCRETE RIBS and/or BEAMS TOE WALLS															
REINFORCEMENT	BOLTS ANCHORS															
PROTECTION	TOE DITCH TOE or SLOPE FENCES NETS															
NO SUPPORT											SCALING NONE					
Table 5 SUGGESTED SUPPORT METHODS																

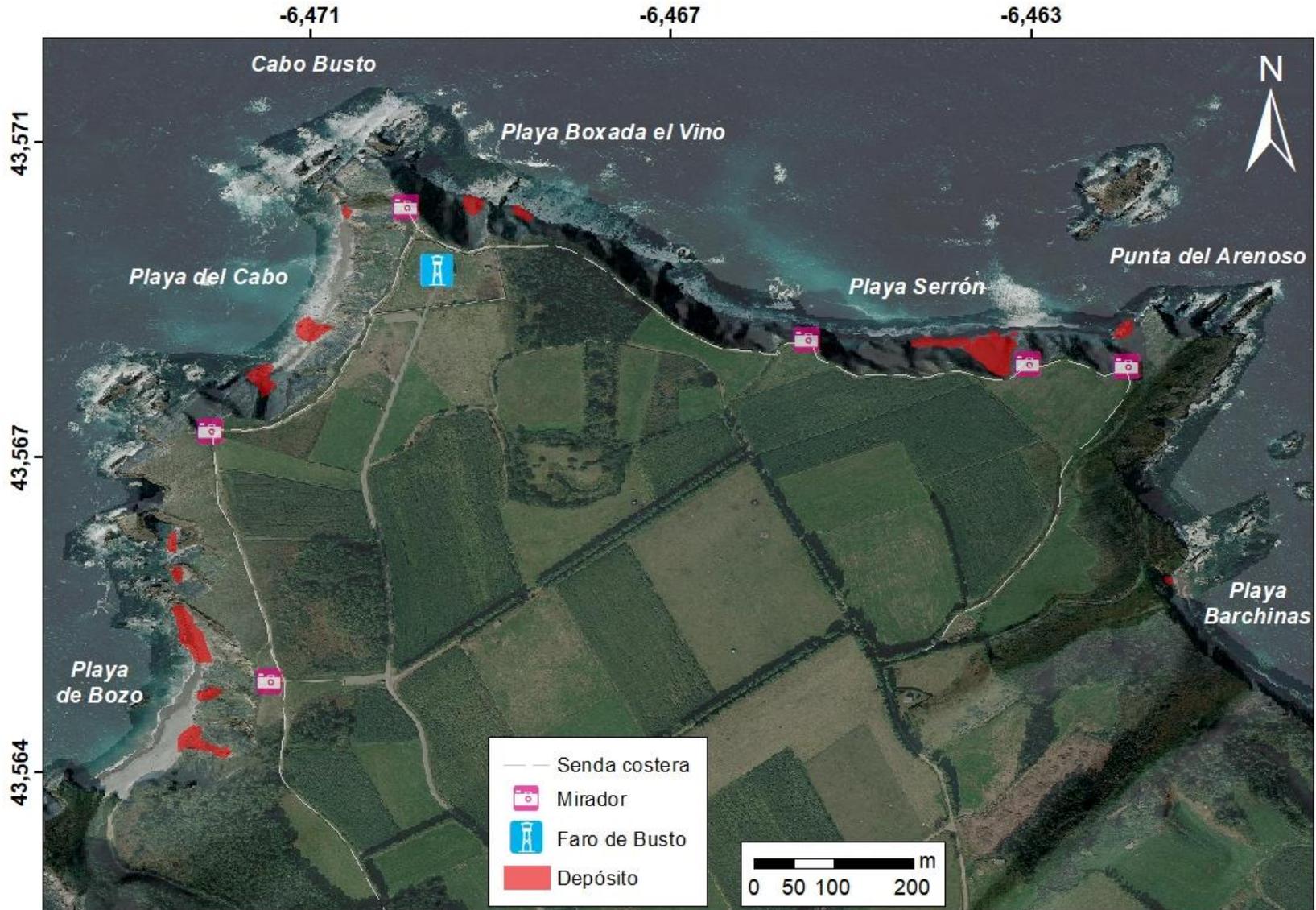
Anexo 12. Cartografía de cicatrices, año 2022



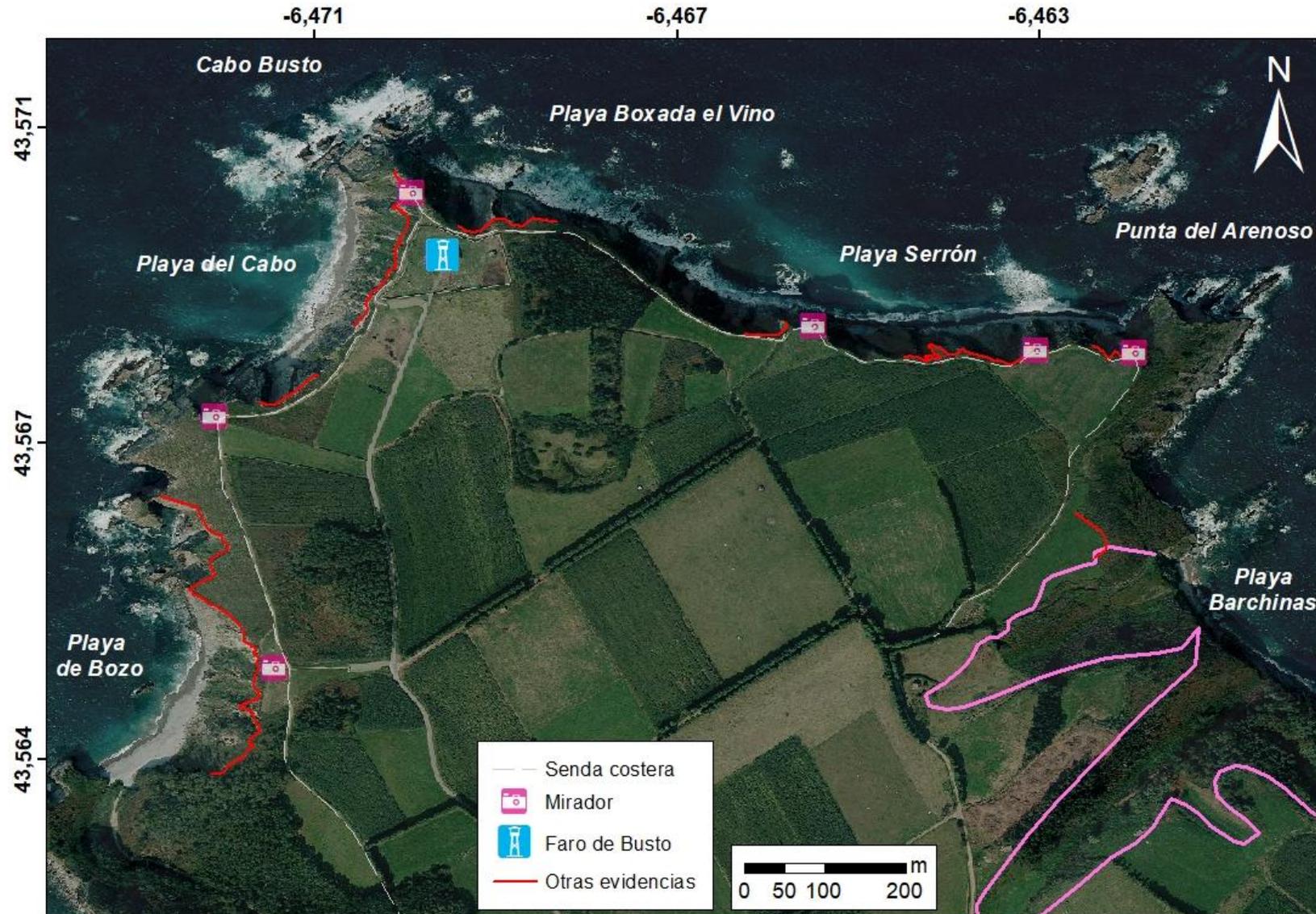
Anexo 13. Cartografía de grietas, año 2022



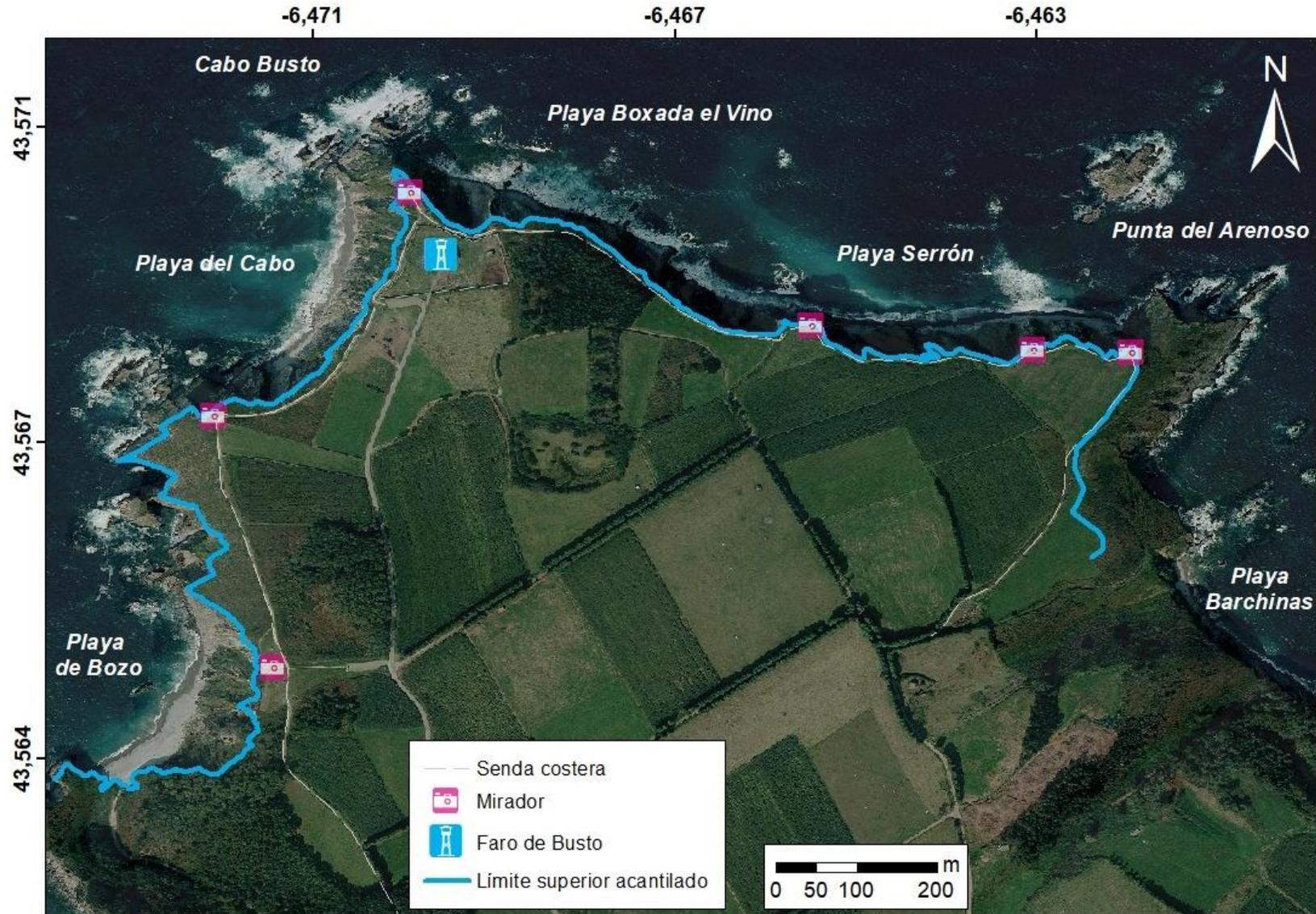
Anexo 14. Cartografía de depósitos de gravedad, año 2022



Anexo 15. Otras evidencias, año 2022



Anexo 16. Límite superior del acantilado, año 2022



Anexo 17. Valles colgados



Anexo 18. Cartografía de vegetación en la zona de estudio

