



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA**

Curso 2024-2025

**Análisis de estabilidad en 3D del acantilado de El
Rincón (Gran Canaria, España)**

***3D stability analysis of the cliff of El Rincon (Gran
Canaria, Spain)***

EDUARDO RENEE CÁRDENAS LEAL

TUTOR/ES DEL TRABAJO: MARTÍN JESÚS RODRÍGUEZ PECES



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA**

Curso 2024-2025

Análisis de estabilidad en 3D del acantilado de El
Rincón (Gran Canaria, España)
*3D stability analysis of the cliff of El Rincon (Gran
Canaria, Spain)*

EDUARDO RENEE CÁRDENAS LEAL

TUTOR/ES DEL TRABAJO: MARTÍN JESÚS RODRÍGUEZ PECES

Fdo.: *Eduardo R. Cárdenas Leal*

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Yo, Eduardo Renee Cárdenas Leal, con NIE Y9785711F, estudiante de Máster Ingeniería Geológica en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2024-2025, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado *Análisis de estabilidad en 3D del acantilado de El Rincón (Gran Canaria, España)*, y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Martín Jesús Rodríguez Peces y Julio GarzónRoca.

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sinmencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en labibliografía. Asimismo, declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 29 de Julio del 2025.

Una firma manuscrita en azul que parece decir 'Eduardo R. Cárdenas Leal'.

Fdo.: *Eduardo R. Cárdenas Leal*



Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético **de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)**

Yo, CÁRDENAS LEAL, EDUARDO RENEE

Con DNI/NIE/PASAPORTE: Y9785711F

declaro de manera responsable que el/la

presente: Trabajo de Fin de Grado (TFG)
 Trabajo de Fin de Máster (TFM)
 Tesis Doctoral

Titulado/a

Análisis de estabilidad en 3D del acantilado de El Rincón (Gran Canaria, España)

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid a 29 de Julio del 2025.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eduardo R. Cárdenas Leal'.

Fdo: *Eduardo R. Cárdenas Leal*

AGRADECIMIENTOS

A mi señora, por su confianza, abnegación, paciencia, y buen humor con lo que ha sabido ceder su tiempo y su espacio para que yo pudiera ocupar el mío en esta etapa. Es un privilegio estar a su lado.

A mi madre, por darme siempre el empuje en el momento justo y necesario.

A Julio Garzón, quien siempre tuvo la disponibilidad y paciencia para despejar mis dudas, me brindó su amistad en el momento en que más lo he necesitado, y presionó para que mejore mi desempeño.

A Jorge Yepes, quien me mostró las particularidades maravillosas del acantilado El Rincón, y fue una guía para poder entender este macizo.

A Martín Rodríguez, quien en el momento en que necesité de un voto de confianza académico y personal, me lo aportó y me ayudó a continuar y finalizar este trabajo.

A Jean Pool Paz, Leonardo Leite, y Andrés Muñoz, por confiar en mí.

A los profesores del máster, por compartir su experiencia con mucha didáctica y claridad, y a mis compañeros en general, por esas largas horas en las que nos reuníamos a resolver problemas, y, gracias a esas reuniones, terminábamos aprendiendo más.

INDICE

1. INTRODUCCION	2
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS	8
4. ACANTILADO EL RINCÓN	9
4.1. Ubicación	9
4.2. Geología	10
4.3. Hidrogeología	17
4.4. Sismicidad	18
5. METODOLOGIA	20
5.1. Trabajo de campo	20
5.2. Gabinete	21
5.3. Modelo Geológico	21
5.2. Modelo Geotécnico	25
5.3. Análisis de estabilidad	25
6. RESULTADOS	27
6.1. Trabajo de campo	27
6.2. Modelo Geológico	27
6.3. Modelo Geotécnico	30
6.4. Análisis de estabilidad	36
7. DISCUSIÓN	42
8. CONCLUSIONES	44
9. BIBLIOGRAFIA	46

RESUMEN

En el estudio y evaluación de inestabilidad de taludes, desde un tiempo a esta parte se vienen utilizando programas para introducir modelos geológicos en tres dimensiones para tener una mejor visión de las zonas que presentan mayor susceptibilidad a la inestabilidad en el tiempo. La necesidad de ajustar parámetros y características de los materiales, y las condiciones físicas que presentan los diferentes materiales que puede conformar un talud, conlleva a, generar modelos cada vez más precisos, y detallados, a esto se suma una topografía a una escala trabajable, dando resultados que pueden ser determinantes en el análisis de estabilidad de un talud complejo.

El presente trabajo, es una muestra de lo que se puede generar en un terreno complejo como lo es uno de origen volcánico como es este caso del acantilado de El Rincón, cuyo perfil estratigráfico muestra horizontes de origen volcánico y continental, con un relieve escarpado propio de un terreno de esta composición y colindante al mar, cuya influencia erosiva también jugó un papel importante en su modelación hasta la actualidad, y, cuya inestabilidad reciente está latente desde el siglo pasado desde que se ejecutaron las labores de construcción de la variante de la carretera antigua, en la que aparecieron grietas en la parte alta (hombro y cresta del talud), y a media ladera, generando preocupación, y optando por dar una solución práctica para el momento, el de colocar un espaldón o contrafuerte de tierras al pie del talud en la zona más crítica. Además, de retirar los cultivos que se tenían en toda la cumbre de este acantilado, lo que aumentaba la inestabilidad debido a la infiltración de agua en el terreno.

Como metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo fue, la recopilación de información geológica, datos e información de estudios previos, y la visita de campo para el cartografiado y obtención de datos litológicos y estructurales. A partir de aquí, se realizó un modelo geológico con los programas Google Earth Pro, ArcGIS 10.8, AutoCAD 2022, y Leapfrog 5.0, que, con este último se desarrolló el modelo geológico tridimensional para luego exportarlo al software Slide3 para su respectivo análisis.

1. INTRODUCCION

El análisis de estabilidad de taludes y acantilados constituye uno de los pilares fundamentales en la ingeniería geológica, debido a la necesidad de garantizar la seguridad de infraestructuras y poblaciones asentadas en su entorno. La singularidad geológica y geomorfológica de las Islas Canarias, compuestas principalmente por materiales volcánicos de diferentes ciclos eruptivos y procesos de alteración, genera escenarios geotécnicos complejos, donde los modelos tradicionales bidimensionales resultan insuficientes para una caracterización precisa del terreno.

El acantilado de El Rincón, ubicado en el noreste de Gran Canaria, es un claro ejemplo de esta complejidad. Desde mediados del siglo pasado se han registrado procesos de inestabilidad asociados tanto a las características litológicas y estructurales de su macizo como a las modificaciones antrópicas derivadas de la actividad agrícola en la parte superior, y a la construcción de infraestructuras viales. La presencia de unidades geológicas con propiedades mecánicas contrastadas, como lavas fonolíticas de alta resistencia y niveles de ignimbritas no soldadas o depósitos piroclásticos alterados con baja capacidad portante y material detrítico presente en una de sus principales formaciones geológicas, sumada a un relieve abrupto y la acción erosiva marina, favorece la generación de mecanismos de fallo por deslizamiento y desprendimiento de material del acantilado.

Con el desarrollo de herramientas de modelización tridimensional en las últimas décadas, es posible integrar de manera coherente la geología, geomorfología y geotecnia en un único modelo que permita evaluar la estabilidad de taludes complejos con mayor precisión. Este trabajo de fin de máster tiene como finalidad realizar el análisis de estabilidad en 3D del acantilado de El Rincón, utilizando softwares especializados como Leapfrog Geo 5.0 y Slide3, con el objetivo de identificar las zonas más susceptibles de deslizamiento bajo diferentes escenarios de carga, incluyendo la influencia de presión de poros y aceleración sísmica.

Además, se pretende contribuir a la mejora del conocimiento geológico local de la zona, integrando los datos de campo con la cartografía regional y aportando una base sólida para futuros estudios y posibles medidas de estabilización que garanticen la seguridad de la infraestructura vial y de las personas que circulan por este tramo de la isla.

2. ANTECEDENTES

El acantilado de El Rincón, situado en el noreste de Gran Canaria, ha sido objeto de atención técnica desde hace varias décadas, principalmente por su complejidad geológica y los problemas de inestabilidad que representa para la infraestructura vial adyacente. Antes de la construcción de la autopista GC-2, la antigua carretera C-810 discurría entre el pie del acantilado y la línea de costa. Fue precisamente durante su construcción, en el año 1944, cuando se produjo un deslizamiento de gran magnitud que afectó a unos 125 metros del trazado, desencadenando la necesidad de intervenciones futuras.



Figura 01: Vista aérea tomada en 1962, donde se aprecia claramente el depósito de derrubios en la base del acantilado y el trazado de la antigua carretera C-810, que discurría en contacto directo con el talud. Esta imagen, visualiza perfectamente la situación previa a los trabajos de ampliación de la GC-2 y ayuda a entender la vulnerabilidad del trazado original frente a eventos de inestabilidad.

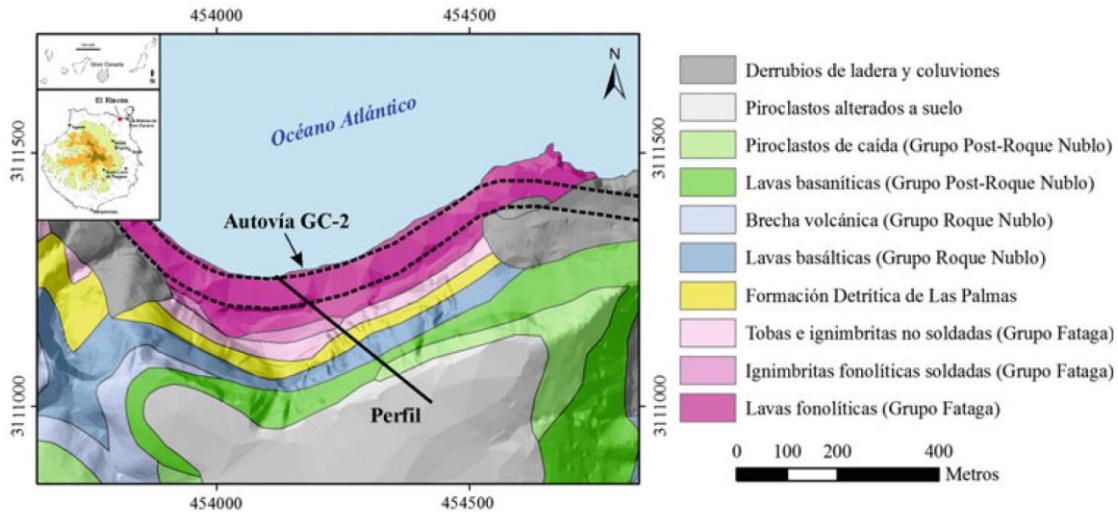
En 1985, con motivo de la ampliación de la GC-2, se llevaron a cabo trabajos de eliminación del material de piedemonte, lo que provocó la aparición de grietas en la coronación y cuerpo del talud. Como respuesta inmediata, se conformó un espaldón de tierras a pie del talud y se instaló una red de puntos de control topográfico. Además, se optó por la retirada de los cultivos en la cumbre para reducir la infiltración de agua y evitar que el avance de las grietas se intensificara. Estas medidas lograron cierta estabilización temporal, aunque la aparición progresiva de nuevas grietas siguió observándose en las décadas siguientes.

Uno de los informes más relevantes sobre la evolución de la inestabilidad del talud es el elaborado por Fariñas en 1991, en el que se presentó un análisis mediante modelos simplificados en dos dimensiones. A pesar de sus limitaciones, este estudio detectó por primera vez la presencia de una capa con slickensides (superficies pulidas indicativas de movimiento) en la base del acantilado. Con base en esta evidencia, se propuso la existencia de un volumen potencialmente inestable que podría abarcar toda la ladera, desde las grietas superiores hasta el pie del talud. Estas observaciones constituyeron el primer intento riguroso de interpretar el comportamiento inestable del macizo desde un enfoque geotécnico.

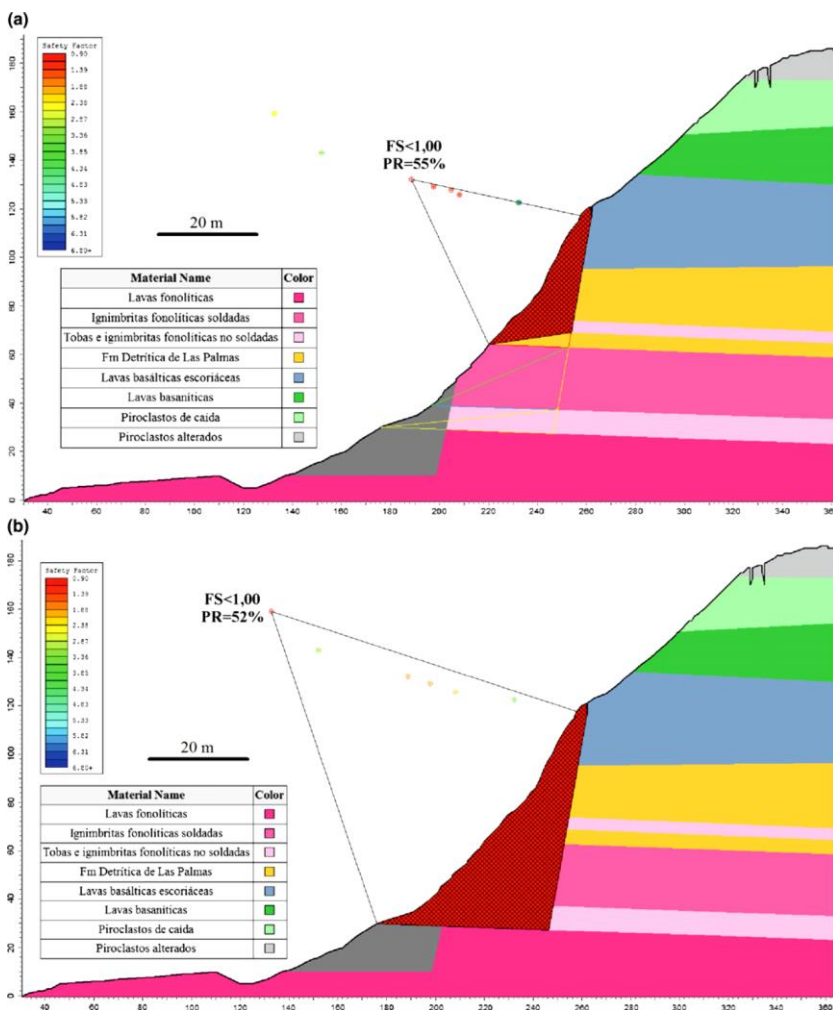


Figura 02: Muestra el detalle de uno de los tantos surcos (surco 18), fotografiado en 1985, durante las labores de inspección posteriores a la aparición de grietas en la coronación del talud. Esta imagen permite ilustrar visualmente las evidencias de deformación superficial observadas en aquel periodo.

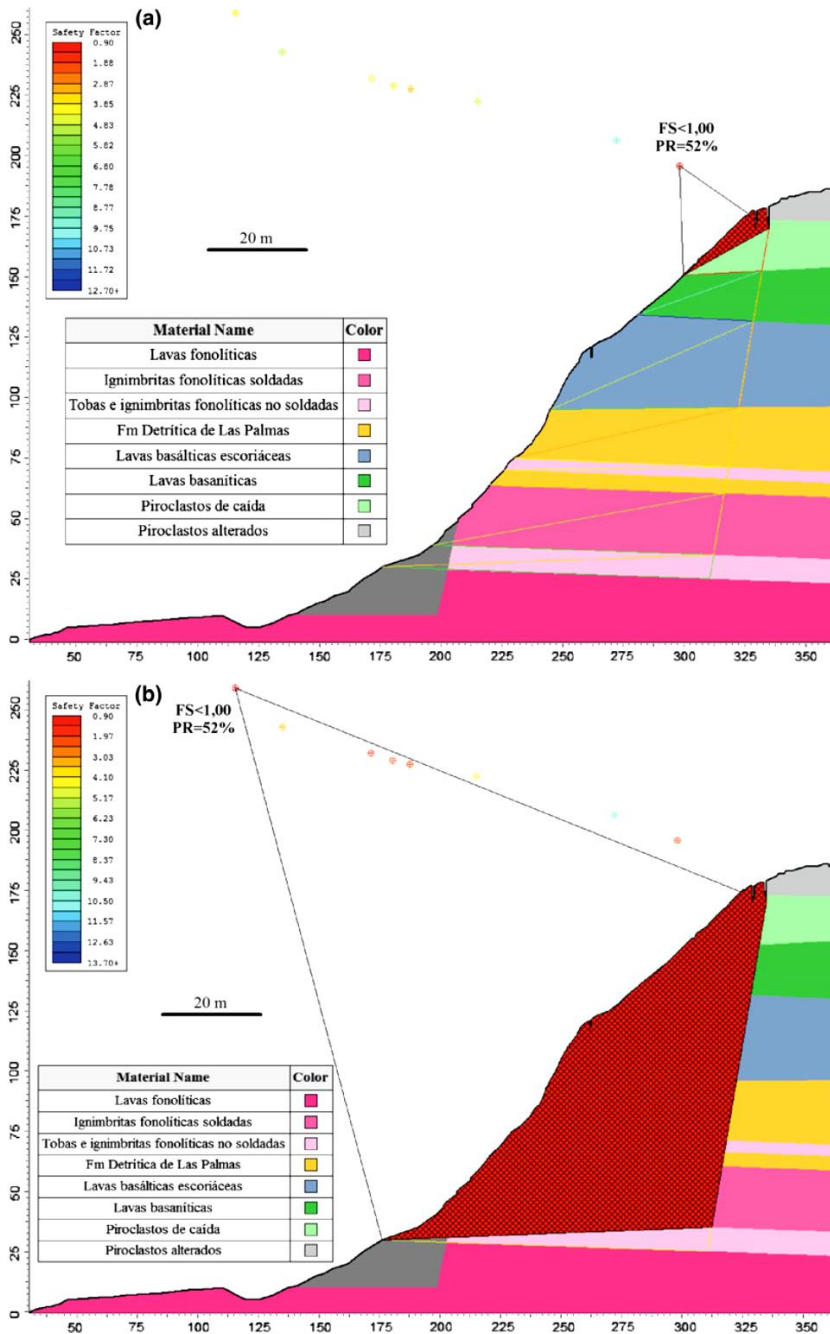
Posteriormente, en el año 2013, en el marco del VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables celebrado en Palma de Mallorca, se presentó un nuevo trabajo sobre el acantilado, desarrollado por Rodríguez-Peces, Yepes y Cabrera. En dicho estudio se realizó un análisis de estabilidad también en 2D, pero basado principalmente en información bibliográfica y cartografía geológica regional, sin incorporar datos detallados de campo ni ensayos in situ. Aunque sus resultados fueron útiles para seguir delimitando áreas críticas, la interpretación seguía sujeta a un nivel alto de incertidumbre debido a la falta de información directa.



Figuras 03: Mapa litológico del acantilado de El Rincón (Gran Canaria) basado en los mapas geológicos del Instituto Geológico y Minero de España (Balcells y Barrera, et al 1987). Se indica la traza de la autovía GC-2 (línea discontinua) y el perfil geotécnico. Rodríguez-Peces et al. (2013).



Figuras 04: Análisis de estabilidad frente al deslizamiento del acantilado de El Rincón, considerando las superficies de rotura generadas por la grieta subvertical situada a media ladera y los contactos litológicos. (a) Bloque inestable de menor tamaño. (b) Bloque inestable de mayor tamaño. FS: Factor de seguridad. PR: Probabilidad de rotura. Rodríguez-Peces et al. (2013).



Figuras 05: Análisis de estabilidad frente al deslizamiento del acantilado de El Rincón, considerando las superficies de rotura generadas por la grieta subvertical situada en cabecera y los contactos litológicos. (a) Bloque inestable de menor tamaño. (b) Bloque inestable de mayor tamaño. FS: Factor de seguridad. PR: Probabilidad de rotura. Rodríguez-Peces et al. (2013).

En contraste con estos trabajos anteriores, el presente TFM se apoya en una campaña de campo que incluyó cartografía, toma de datos estructurales y ensayos con esclerómetro para estimación de resistencia. Además, se ha llevado a cabo una modelización tridimensional geológica y geotécnica, permitiendo una aproximación mucho más ajustada a la geometría real del talud y a la distribución de los materiales que lo componen. Esta metodología no sólo refuerza los hallazgos previos, sino que también proporciona una base sólida para el análisis de estabilidad en condiciones estáticas, pseudoestáticas y bajo presión de poros, con el fin de evaluar el comportamiento potencial de la ladera en distintos escenarios.



Figuras 06: *Vista actual de parte de la grieta principal. La grieta sigue paralela al hombro del talud del acantilado. Nótese la amplitud de la abertura de la grieta principal.*

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es analizar las zonas más susceptibles de deslizarse en el acantilado, bajo condiciones normales y extremas introduciendo al modelo presión de agua en los poros, y aceleración sísmica, utilizando los parámetros máximos, mínimos y medios ponderados de los diferentes materiales que conforman el talud.

Con el fin de lograr este objetivo, se planteó los siguientes pasos:

- Recopilación de antecedentes en el contexto geológico, y geomorfológico.
- Toma de datos de campo.
- Elaboración del modelo geológico utilizando los programas Google Earth Pro, ArcGIS 10.8, AutoCAD 2022 y Leapfrog 5.0, a partir de información recopilada y de campo.
- Elaborar el modelo geotécnico usando el software Slide3, en el que se introdujeron los valores de los parámetros geotécnicos teóricos.
- Realizar el análisis de estabilidad bajo las diferentes condiciones y escenarios, tanto desfavorables como favorables, determinando zonas de susceptibilidad al deslizamiento.
- Mejorar el modelo geológico local, aportando detalles al modelo geológico regional del IGME (MAGNA 40), con miras a continuar la mejora de detalles a futuro.

UPER

4. ACANTILADO EL RINCÓN

4.1. Ubicación

El acantilado de El Rincón se encuentra en la isla de Gran Canaria, perteneciente al conjunto de islas de la comunidad autónoma de Canarias, España. Se ubica exactamente en las coordenadas geográficas de latitud $28^{\circ} 7'26.73''N$ y longitud $15^{\circ}27'53.35''W$, situado en el extremo nororiental de la isla, el acantilado muestra en su perfil la complejidad de la formación geológica de la isla en sus etapas más recientes.

El acantilado se extiende más de 800 metros de longitud aproximadamente en su coronación, y a unos 185 metros de cota máxima aproximada en su coronación con respecto al nivel medio del mar. El pie del talud tiene una distancia a la línea de costa que varía entre los 65 metros y 175 metros aproximadamente. Con respecto a la autopista, la distancia del pie del talud al lateral de la calzada más cercana al talud varía entre unos 40 metros y unos 130 metros aproximadamente.

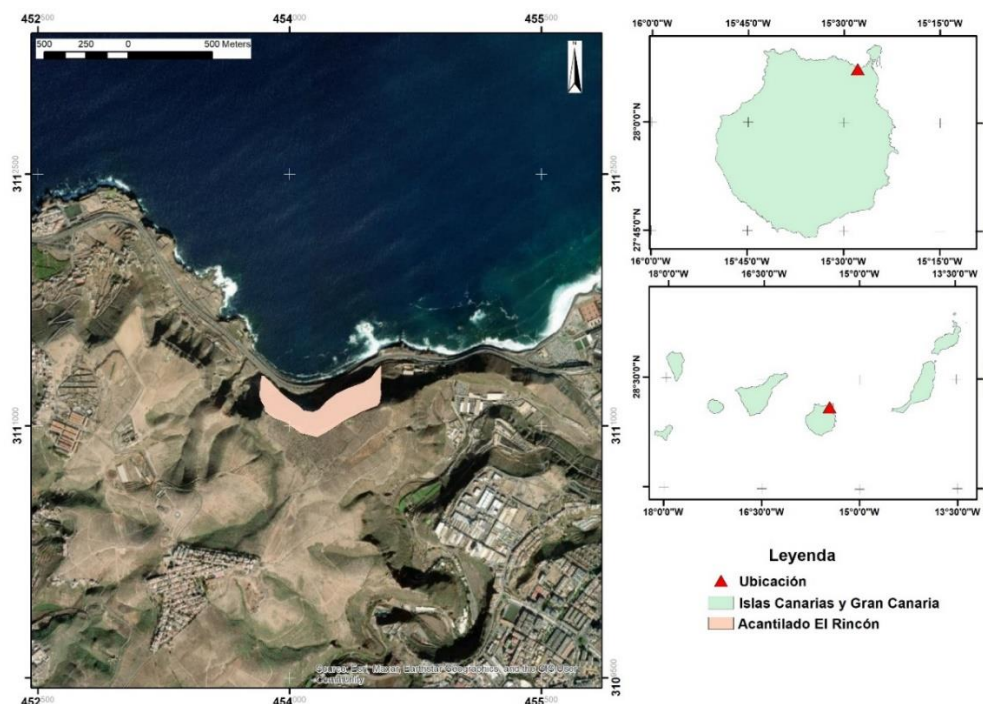


Figura 07: Mapa de ubicación tanto regional como local del acantilado de El Rincón. Este mapa muestra con precisión la zona de estudio dentro del contexto geográfico de la isla.

El clima en esta parte de la isla se describe como un clima semiárido cálido (BSH), con una temperatura media anual de $18.8^{\circ}C$, con veranos calurosos, húmedos y hasta áridos. Con inviernos largos, secos y ventosos, mayormente despejado. La temperatura varía entre los $13^{\circ}C$ y $30^{\circ}C$ en el transcurso del año. La frecuencia de días mojados no varía considerablemente según la estación.

Entre los días mojados distinguimos entre los que tienen solamente lluvia, solo nieve, o una combinación de ambos. El patrón de lluvias es similar al mediterráneo, en verano sin embargo nunca llueve, de igual forma, la cantidad total de lluvia que cae en un año está por debajo de los 150 mm, por lo que se puede considerar desértico, salvo por alguna anomalía en el clima del Atlántico, el cual puede perturbar el clima de la isla de forma puntual.

4.2. Geología

El acantilado El Rincón, muestra en su afloramiento el perfil estratigráfico que va de piso a techo (Figura 08), en un inicio y aflorando desde el final del espaldón de tierras hacia el extremo oeste del acantilado unas lavas fonolíticas pertenecientes al Grupo Fataga, a manera de coladas de espesores variados, con textura afanítica y alguna rara presencia de cristales de sanidina de unos 2 a 4 mm; prácticamente ocupan el basamento de la isla, y aparece en una gran extensión. Este constituye las últimas emisiones del Ciclo I (Mioceno).

C U A D R O I

LIETZ y SCHMINCKE (1975)
MC DOUGALL y SCHMINCKE (1976)

FUSTER et al. (1968) MAGNA

SERIE BASALTICA IV	FASE III	Sup. Inf.	CICLO RECIENTE	
SERIE BASALTICA III	Formación post Los Llanos -----?-----?-----?	Sup. Med. Inf.	CICLO POST ROQUE NUBLO	
SERIE BASALTICA II	Formación Los Llanos de la Paz			
SERIE ROQUE NUBLO	FASE II Grupo Roque Nublo Formación Las Palmas	Miembro sup. FDP Coladas básicas Miembro med. FDP	CICLO ROQUE NUBLO	
SERIE PRE ROQUE NUBLO				
SERIE FONOLITICA	FASE I Formación Arguineguín ----- Formación Fataga -----	Miembro inf. FDP Lavas e Ignimb.	Form. fonol.	CICLO I
COMPLEJO TRAQUI-SIENITICO.	Formación Mogán	Formación traquí tico-riolítica.		

Tabla 01: Extracto de la primera edición (1990) de la hoja y memoria de la geología regional de Canarias. Se recogen las correlaciones estratigráficas propuestas por distintos autores para los depósitos volcánicos de Gran Canaria. Esta información fue tomada de la primera edición de la memoria geológica de Canarias del Plan MAGNA, y permite entender cómo han evolucionado las clasificaciones de las unidades en función de los criterios estratigráficos y volcanológicos aplicados.

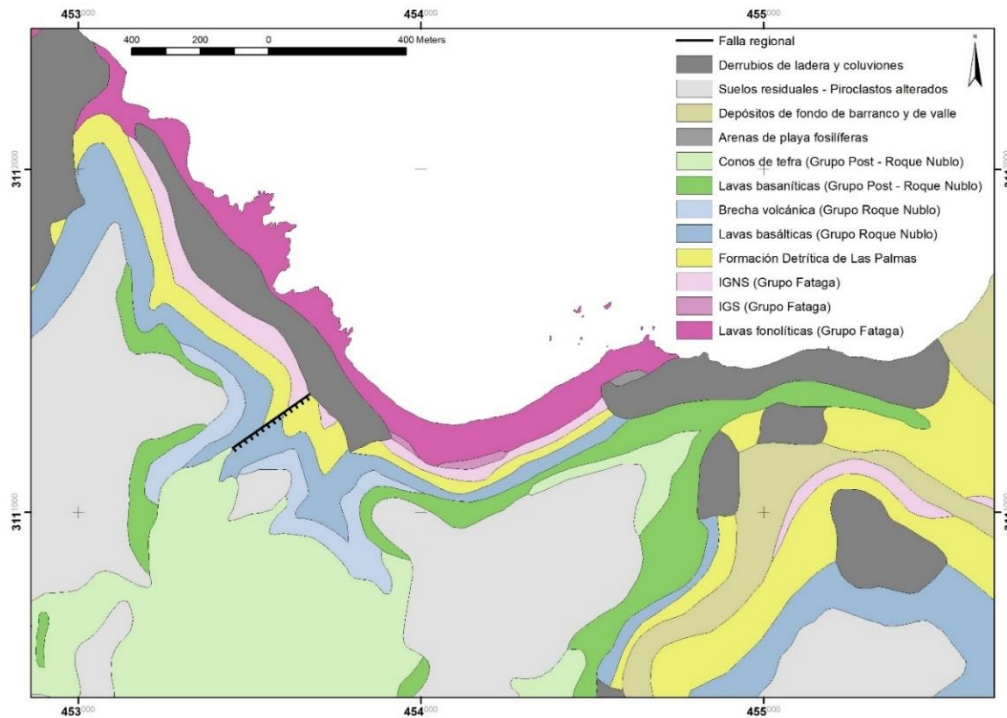


Figura 08: Mapa geológico regional del área de estudio, extraído del MAGNA 50 del IGME. Este mapa permite identificar las unidades geológicas regionales que afloran en la zona del acantilado y sirve de base para la interpretación estratigráfica y estructural del perfil geológico.



Figura 09: Afloramiento donde se distingue con claridad el contacto entre las ignimbritas no soldadas (IGNS) en la base y las ignimbritas soldadas (IGN) por encima. Este detalle resulta clave para entender la superposición de materiales en el talud, así como para reconocer el contraste en sus propiedades mecánicas.



Figura 10: Afloramiento que muestra el dique andesítico que corta de forma visible las unidades de ignimbritas no soldadas (IGNS) y soldadas (IGN). Este afloramiento permite identificar la relación de intrusión entre estas litologías, y, este dique tiene la dirección semejante a la tendencia de la cara principal del acantilado, y de las grietas presentes en la coronación, además, resalta la presencia de un lente de gravas y arenas, lo que sugiere procesos deposicionales contemporáneos al enfriamiento de los depósitos piroclásticos.

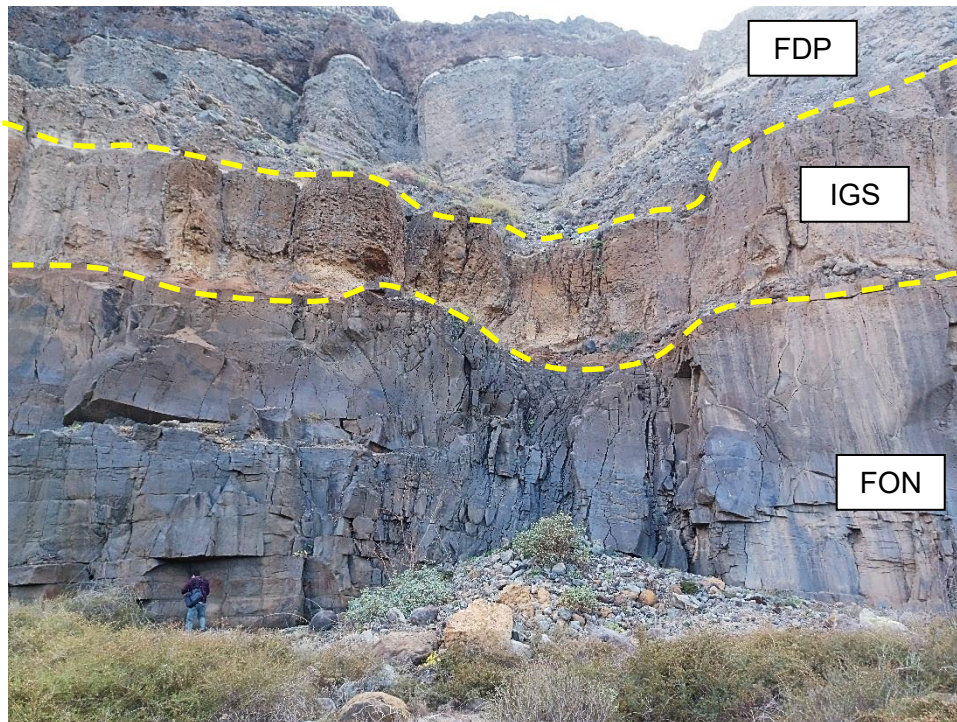


Figura 11: Vista que muestra una sección donde afloran tres unidades principales: las lavas fonolíticas en la base (FON), seguidas por las ignimbritas soldadas (IGS) y finalmente la Formación Detrítica de Las

Palmas (FDP). Esta imagen ayuda a visualizar cómo se organizan verticalmente las unidades y permite corroborar las relaciones de contacto descritas en campo.

Estas lavas fonolíticas, están en contacto en su techo, desde el tramo central donde el material del espaldón cubre el afloramiento hasta el extremo Este, con unas tobas e ignimbritas no soldadas tipo “ash & pumice” (IGNS) pertenecientes al Grupo Fataga (Mioceno), de color blanquecino (a veces de color hueso) a crema claro, compuesto por fragmentos vesiculares de pómez, y bloques angulosos a subangulosos; a veces presenta interdigitación con bloques subredondeados y gravas con arenas. Estas IGNS en este sector tiene un espesor que varía entre unos 3 metros y 5 metros como máximo.

Sobre el techo de estas estas IGNS y el techo de las lavas fonolíticas, se encuentran las ignimbritas y coladas piroclásticas soldadas (IGS), estas pertenecientes al Grupo Fataga (Mioceno), la matriz es pardo rojizo por la oxidación de sus minerales, y por zonas es algo brechoide tipo “block & ash”. Su espesor fluctúa de unos 5 metros a unos 18 metros aproximadamente, sobre todo en el sector occidental del talud. Cortando las IGNS y las IGS desde la base, se encuentra un dique andesítico de 30 a 40 cm de espesor, con Dip Direction: 320°/87°, el cual es relativamente paralela a la cara principal del acantilado, y se observa que llega hasta la base de la formación detrítica de Las Palmas (FDP) (Figura 10).

La secuencia siguiente corresponde a la formación detrítica de Las Palmas (FDP), que en líneas generales está conformada por unidades sedimentarias detríticas, de depósitos continentales, y marinos, y algunas intercalaciones piroclásticas (Figura 09). Según la literatura, en este tramo aflora el miembro inferior y medio, con lo que se corrobora la presencia de un horizonte de piroclastos de color claro (Figura 10) en la media ladera, con un espesor aproximado que varía de 4 metros en el lado Oeste y central del talud, a poco más de 10 metros hacia el Este del talud, ubicándose en el tercio inferior de todo el horizonte de la FDP. Este horizonte no se incluyó en el modelamiento.

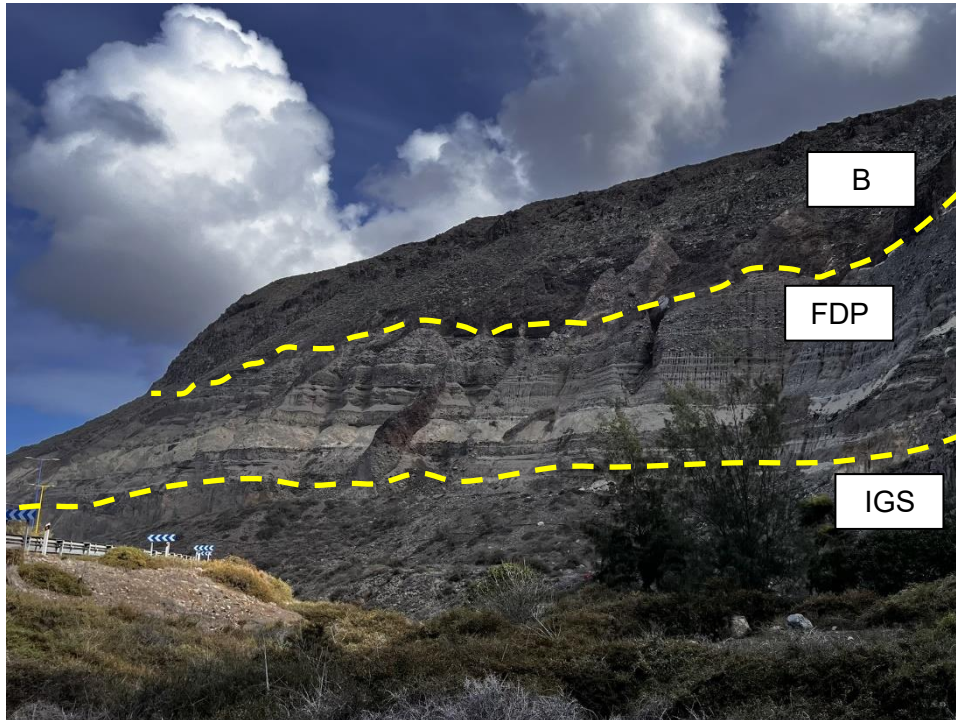


Figura12: Afloramiento que muestra un horizonte delgado, que se asume que son tobas claras, que se encuentran en medio de la Formación Detrítica de Las Palmas (FDP), la cual se encuentra entre las ignimbritas soldadas (IGS) y las lavas basálticas escoriáceas del Grupo Roque Nublo (B).

Continuando con la secuencia, sobre esta formación se encuentran las lavas basálticas escoriáceas pertenecientes al Grupo Roque Nublo, en la que se pueden observar algunas “pillow lavas”, se encuentran oxidadas, con coloraciones negruzcas y rojizas (Figura 13). Hacia el Oeste del talud, está presente la brecha volcánica Roque Nublo, la cual se acuña desde el Este hacia antes de la parte central del talud, consiguiendo que la secuencia volcánica superior esté en contacto con las lavas basálticas escoriáceas del Grupo Roque Nublo.

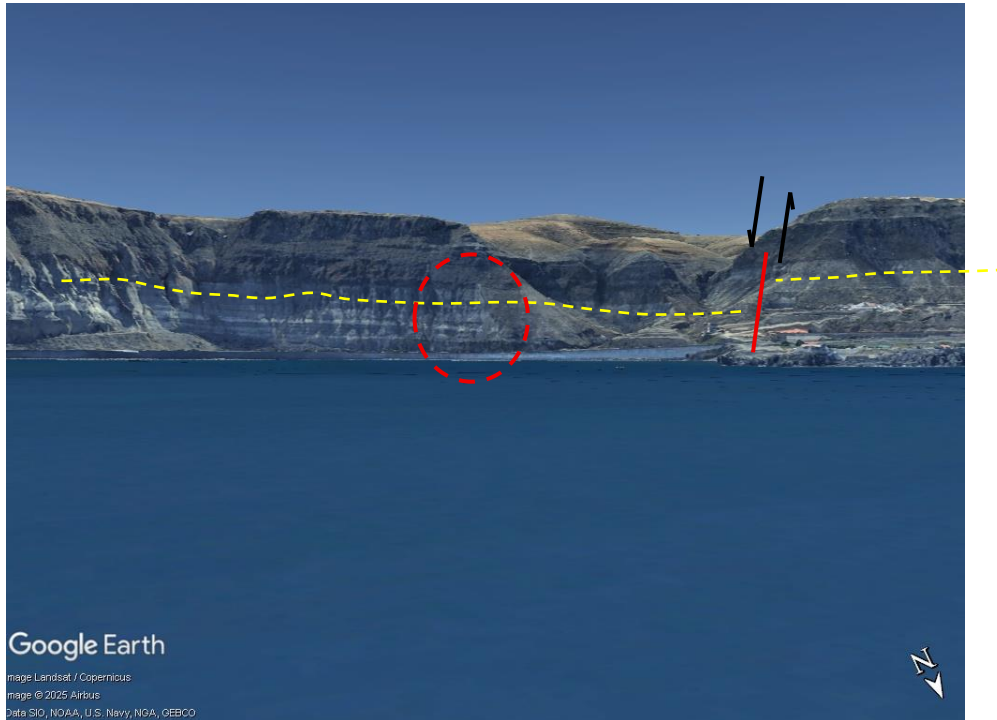
Sobre estas lavas basálticas escoriáceas y la brecha volcánica pertenecientes al Grupo Roque Nublo, descansan las lavas basálticas pertenecientes al Ciclo Post Roque Nublo. Consisten en flujos de lava masiva de 2 a 3 metros de espesor, con presencia de pómez y “pillow lavas”. Finalizando, sobre estas secuencias se encuentran los conos de tefra y piroclastos (lapillis, escorias y bombas) pertenecientes al Ciclo Post Roque Nublo (Figura 14), gradando a suelos residuales (piroclastos alterados) en gran parte de la superficie de la parte alta, en donde se ven huellas de restos de terrenos de cultivo.



Figura 13: Afloramiento que muestra las lavas basálticas escoriáceas del Grupo Roque Nublo, con presencia de pillow lavas. Este afloramiento evidencia condiciones de enfriamiento rápido en ambiente subacuático o con humedad alta, lo que influye directamente en la fracturación del material y, por tanto, en su comportamiento geotécnico.



Figura 14: Afloramiento representativo de los depósitos de tefra y piroclastos del Ciclo Post Roque Nublo. Se observa un grado alto de meteorización (GM IV – V – VI), lo que justifica su clasificación como suelo residual en el modelo geotécnico. Este material presenta baja resistencia, y alta porosidad, siendo estas particularidades las que lo caracterizan.



Figuras 15: Vista panorámica tomada desde el NNE hacia el SSW en Google Earth Pro, en la que se delimita el contacto entre la Formación Detrítica de Las Palmas y las lavas basálticas del Grupo Roque Nublo con una línea amarilla entrecortada. Aquí destacan una zona de esfuerzo en las fonolitas, observada en campo, lo que podría estar relacionado con deformaciones internas en el macizo, y un desplazamiento sub vertical, en la que el bloque oriental cae y el occidental queda arriba.

Estructuralmente, hacia el Oeste del acantilado, en el sector del Barranco de la Cochina, existe un salto en la continuación de los depósitos volcánicos y detríticos, el cual se puede observar desde la costa o desde el mar, donde se puede ver que el bloque occidental delimitado por dicho barranco está a un nivel, y el bloque oriental sobre el que se encuentra el acantilado, está más abajo en la secuencia (Figura 15).



Figuras 16: Afloramiento que muestra grietas de tracción desarrolladas en las lavas fonolíticas, localizadas hacia el sector del Barranco de la Cochina, en el lado occidental del acantilado. Estas estructuras son indicativas de tensiones internas en el macizo y pueden estar vinculadas con procesos de deformación regional o ajustes locales por movimientos diferenciales en el acantilado.

Los esfuerzos se ven reflejados en estructuras tensionales cortantes que se encuentran en las lavas fonolíticas (Figura 16), coincidiendo con la orientación y dirección de desplazamiento de estos bloques.

4.3. Hidrogeología

Los materiales que conforman el acantilado de El Rincón se disponen generalmente en secuencias subhorizontales o con suaves o muy poco pronunciadas inclinaciones con dirección al mar, aunque localmente pueden presentar buzamientos más pronunciados. Este marco geológico controla de manera directa el comportamiento hidrogeológico de todo el macizo. Visto hidrogeológicamente, los basaltos y traquitas fisuradas funcionan como acuíferos locales debido a su elevada permeabilidad secundaria, la cual se debe principalmente a la presencia de fracturas, diaclasas y contactos entre coladas.

En contraste, las ignimbritas fonolíticas suelen presentar una baja permeabilidad, actuando como capas confinantes o semiconfinantes que limitan la circulación vertical del agua. Así, la heterogeneidad litológica del conjunto genera un sistema de flujos subterráneos complejos, donde el agua se desplaza preferentemente a través de las unidades más permeables hasta encontrar estas capas menos permeables, que pueden inducir surgencias de agua locales si interceptan la superficie del relieve topográfico.

La recarga de estos acuíferos proviene de las precipitaciones que se infiltran en las zonas más altas de la isla, alimentando un flujo descendente por gravedad hacia la costa. Sin embargo, en la franja costera, el sistema se ve afectado por la intrusión marina, que genera una cuña salina hacia el interior. Esta intrusión hipersalina limita la calidad de las aguas subterráneas y es favorecida por la sobreexplotación histórica antrópica de los acuíferos mediante galerías y pozos, la cual ha provocado descensos de los niveles piezométricos y un avance progresivo de la salinización en las zonas costeras por la intrusión del mar.

En el presente estudio no se ha considerado la influencia hidrogeológica marina directa, dado que no se dispone de datos específicos sobre el nivel freático ni sobre condiciones de saturación permanentes en profundidad.

De manera puntual, en el acantilado y alrededores, no se observan surgencias de agua que sugieran que el macizo se encuentre saturado, y con presión de agua interna, además, actualmente ya no se vienen realizando actividades agrícolas en la parte superior, con lo que toda infiltración de agua al terreno será netamente por precipitaciones meteorológicas.

4.4. Sismicidad

La isla se encuentra sobre la placa africana en un contexto tectónico intraplaca. En términos generales, la sismicidad en Gran Canaria es baja, ya que no existen límites de placas activos cercanos que puedan generar sismos de gran magnitud. Los registros históricos muestran que los sismos son poco frecuentes y, cuando ocurren, suelen tener magnitudes reducidas, generalmente inferiores a 4.0 en la escala de Richter.

Aun así, en algunos estudios de peligrosidad sísmica se han estimado valores de aceleración sísmica básica en el orden de 0.04g a 0.06g, dependiendo de la normativa de referencia y el tipo de estructura analizada (Figura 17). Estos valores son considerados bajos si se comparan con zonas de actividad sísmica moderada o alta. Sin embargo, en proyectos de ingeniería geotécnica es habitual incorporar el efecto sísmico mediante un análisis pseudoestático, aunque su influencia en la estabilidad global de laderas y acantilados como El Rincón no sea determinante frente a otros factores más relevantes, como la erosión marina, la meteorización de los materiales volcánicos y los procesos gravitacionales que actúan continuamente.

En resumen, la amenaza sísmica en esta zona es baja, pero su consideración en el análisis geotécnico es necesaria para cumplir con la normativa vigente y para garantizar un diseño seguro ante posibles eventos, aunque sean de pequeña magnitud.

El valor utilizado para el análisis pseudoestático fue sacado de la página del IGN, y es de 0.06 (g), el máximo valor.

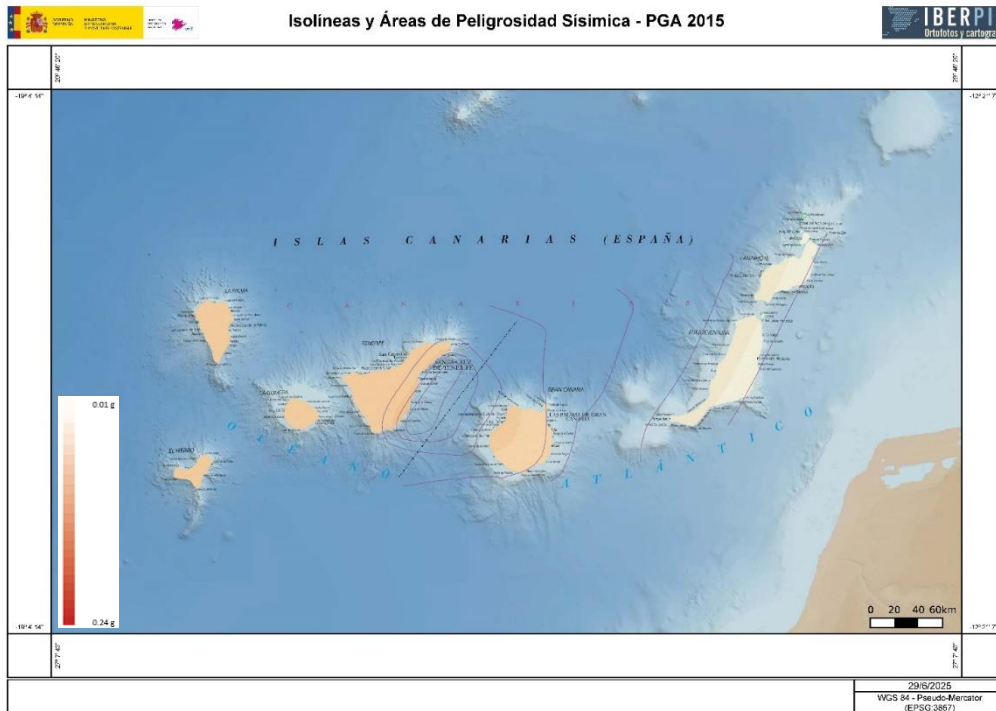


Figura 17: Mapa de peligrosidad sísmica según la PGA 2015. Se emplea para justificar la elección del valor de aceleración pseudoestática adoptado en el análisis, que corresponde al valor más alto registrado para la zona según el IGN.

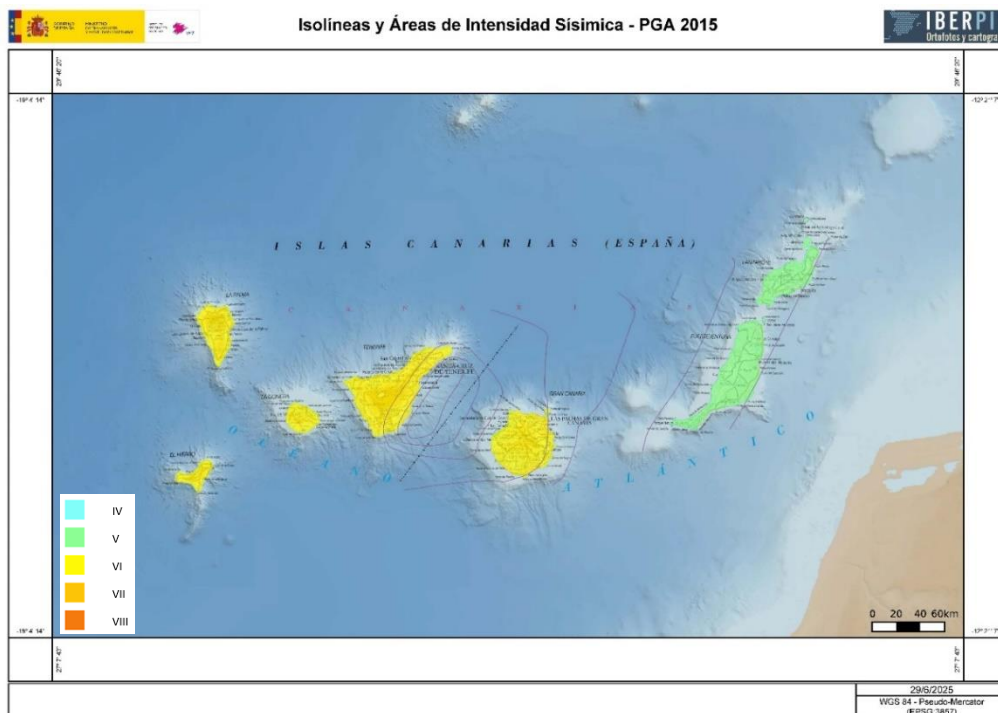


Figura 18: Mapa de intensidad sísmica según la PGA 2015 esperada para la isla de Gran Canaria. Esta información se consideró en la selección de parámetros sísmicos, aunque la actividad tectónica regional es baja, como se comentó en el apartado de sismicidad.

5. METODOL+OGIA

La metodología empleada en este trabajo se estructura en cuatro fases fundamentales: recopilación de información, trabajo de campo, modelización geológica y geotécnica, y análisis de estabilidad. A continuación, describo los trabajos de campo y gabinete, y la modelización geológica y geotécnica.

5.1. Trabajo de campo

Se realizó una campaña de campo durante el mes de [mes y año], con el objetivo de levantar información estructural, geológica y geomecánica en distintos puntos accesibles del acantilado de El Rincón.

Las tareas incluyeron:

- Reconocimiento visual de las unidades litológicas aflorantes.
- Medición de estructuras principales.
- Observación y registro de fenómenos de inestabilidad superficial.
- Ensayos con martillo de Schmidt tipo L en diversos litotipos, incluyendo fonolitas, ignimbritas, lavas almohadilladas y piroclastos, siguiendo una metodología sistemática con múltiples impactos por estación.



Figura 19: Ensayo de esclerometría con martillo Schmidt. Ensayo realizado sobre los piroclastos de caída, en la coronación del acantilado El Rincón. Marzo 2024.

Se utilizaron fotografías georreferenciadas, notas de campo y registros en coordenadas UTM. Los resultados de esta campaña se emplearon posteriormente para definir el modelo geológico, ajustar parámetros geotécnicos y validar el comportamiento observado en el software de estabilidad.

La campaña de campo permitió identificar diversas unidades geológicas en afloramiento, cuyo contacto y geometría se ajustaron posteriormente en el modelo Leapfrog. En cuanto a los ensayos con martillo de Schmidt, se calculó la resistencia a la compresión simple a partir de los valores que arrojaba el martillo en cada golpe, estos valores, representados en la tabla 2 y en la figura 34, muestran una dispersión coherente con las características estructurales de cada material y fueron claves para asignar propiedades al modelo geotécnico. Adicionalmente, se confirmó la existencia de zonas fracturadas intensamente en la base del talud y se observaron indicios de erosión regresiva en el contacto entre unidades piroclásticas y brechas.

5.2. Gabinete

Luego, se elaboró un modelo geológico tridimensional a partir de la integración de datos de campo y cartografía regional, utilizando los programas Google Earth Pro, ArcGIS 10.8, AutoCAD 2022 y Leapfrog Geo 5.0. La geometría estratigráfica fue definida con base en secciones geológicas interpretadas, sobre las cuales se proyectaron sondeos ficticios de hasta 250 metros de profundidad para poder definir los contactos litológicos en profundidad. Posteriormente, se construyó el modelo geotécnico en el software Slide3, al que se exportó la geometría generada en Leapfrog en formato .dxf. Se asignaron parámetros geomecánicos a cada unidad, en base a los datos bibliográficos y valores obtenidos en estudios previos como el de Rodríguez-Peces et al. (2013). Los valores de peso específico, resistencia a compresión simple, índice *GS* y parámetro *mi* fueron determinados por litotipo.

Para el análisis de estabilidad se aplicaron los métodos de equilibrio Límite Janbu Simplificado y GLE/Morgenstern-Price. Se consideraron cuatro escenarios: sin presión de poros ni carga sísmica; con presión de poros; con carga sísmica (pseudostático); y finalmente con ambas condiciones. La aceleración sísmica adoptada fue de 0.06 g y los valores de presión de poros (*Ru*) se estimaron por litología según condiciones de saturación máxima.

5.3. Modelo Geológico

Para el modelo tridimensional, se proyectaron sondeos de 100 a 250 metros de profundidad en las secciones interpretadas, teniendo en cuenta de que los sondeos

atravesen todos los contactos en el interior, los que fueron interpretados en superficie. La interpretación del alcance de las IGN, IGNS, y la Brecha Roque Nublo, es conservadora y quizá no es la adecuada en su distribución espacial interna, pero, no se encontraron más indicios en superficie para poder extender más estas capas en el modelo.



Figura 20: Vista oblicua hacia el sureste del acantilado obtenida con Google Earth Pro, donde se han señalado los puntos exactos en los que se tomaron datos geológicos y geotécnicos en campo. Esta imagen permite ubicar espacialmente los levantamientos realizados y contextualizar el trabajo de campo sobre el terreno.

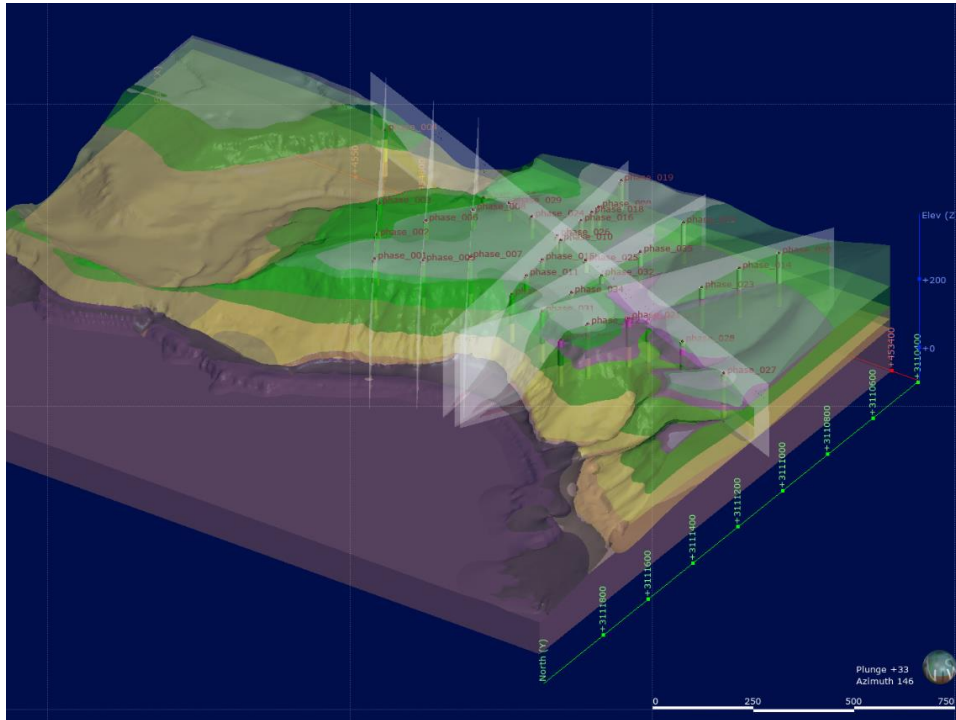


Figura 21: Vista oblicua hacia el sureste del modelo tridimensional desarrollado. Se aprecian las secciones y sondeos generados como parte del proceso de interpretación del subsuelo, lo que da una idea del volumen modelado y de cómo se distribuyen las unidades litológicas internamente.

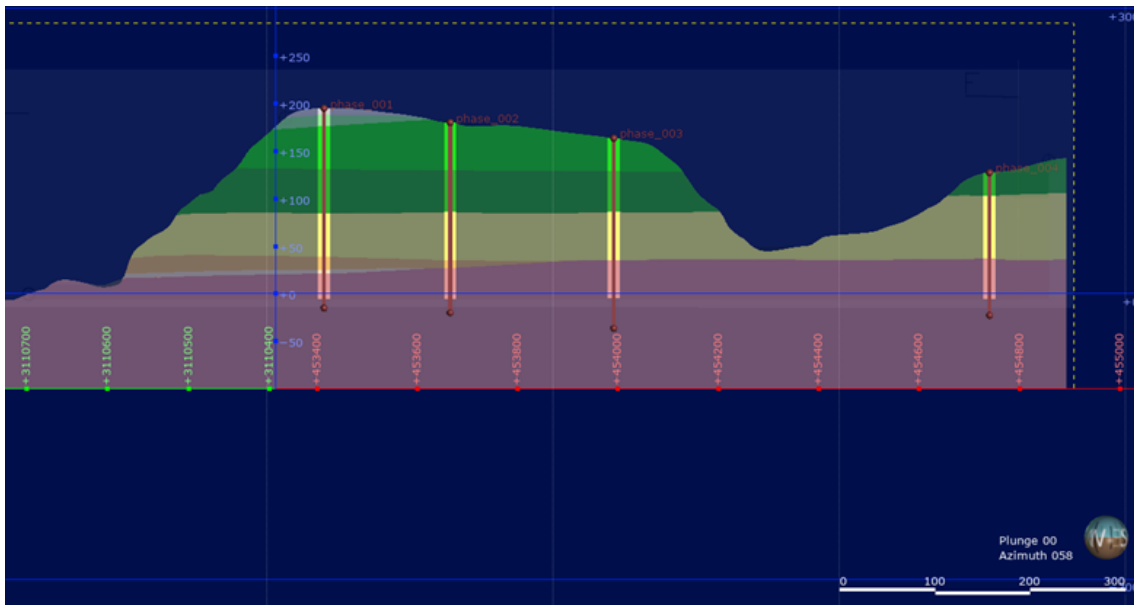


Figura 22: Sección A, se muestran los cortes geológicos empleados para construir el modelo 3D. Aquí se visualizan también los sondeos utilizados como base para definir los contactos entre las diferentes formaciones.

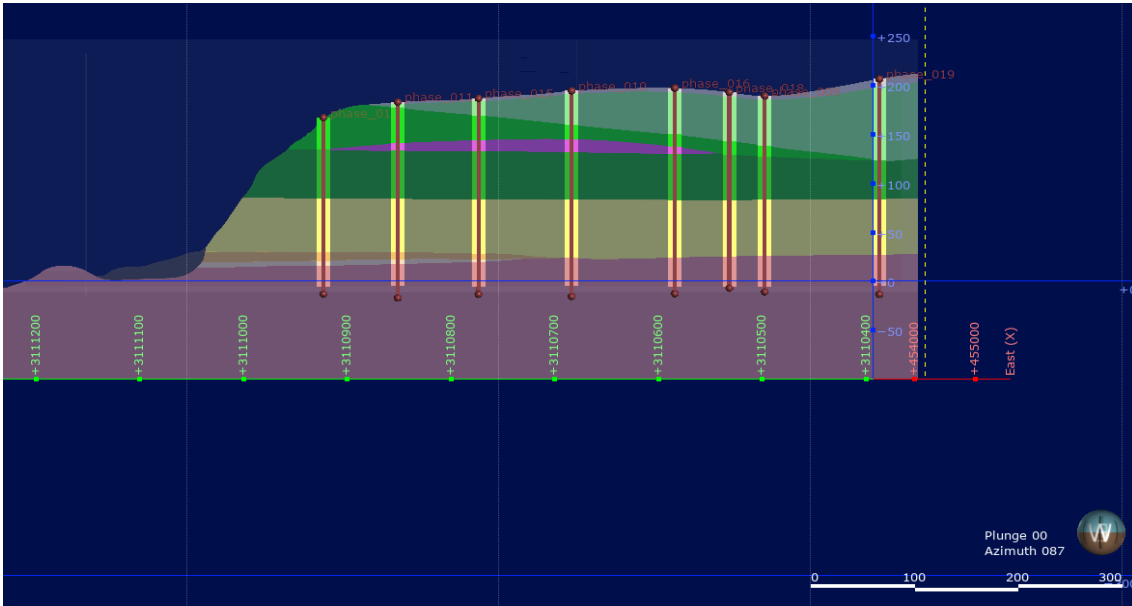


Figura 23: Sección D, se detalla la interpretación interna del macizo, destacando la presencia de la brecha volcánica del Grupo Roque Nublo como un lente. También se evidencian los horizontes de las ignimbritas soldadas y no soldadas, que muestran una geometría de acuñamiento hacia el interior del talud.

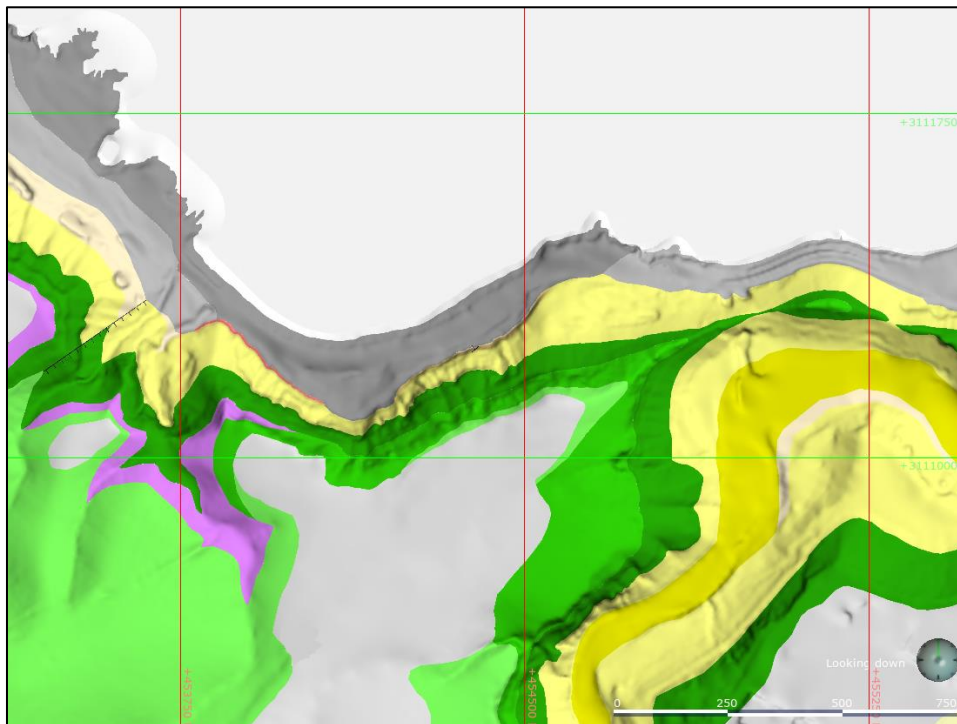


Figura 24: Mapa geológico final obtenido tras la integración de los datos de campo y el modelado en Leapfrog. En él se representan las unidades geológicas principales, sus contactos, y la geometría general del macizo estudiado.

No se modeló el horizonte delgado (con espesor variable observado en las imágenes satelitales de unos 5 metros a unos 10 metros aproximadamente) de tobas claras (no soldadas), que se encuentra dentro de la Formación Detrítica de Las Palmas (FDP), ya

que la cota en la que se encuentra era muy variada, por lo que era muy complicado modelarla sin una georreferenciación adecuada, con lo que, su modelado podría influenciar en el análisis de estabilidad.

5.2. Modelo Geotécnico

Para obtener los valores de los parámetros de resistencia de los diferentes litotipos, se tomaron datos de golpeo realizados con el martillo Schmidt o esclerómetro del tipo L (RL). Los golpes fueron ejecutados tanto en matriz rocosa como en clastos (para los materiales que lo presentaban). Sin embargo, los valores obtenidos presentaron variaciones que reflejaban desviaciones estándar que se pueden ver en la figura 28, para la cantidad de datos tomados, esto podría reflejar resultados ambiguos. Los datos utilizados para las propiedades de los diferentes litotipos fueron sacados de la información teórica utilizada en el trabajo realizado por: Rodríguez-Peces, Yepes, Cabrera Fuentes et al (2013), esto debido a que, estos valores ya habían sido utilizados para el análisis de estabilidad en 2 dimensiones.

Con el modelo geológico tridimensional ya definido, se migró (exportó) al programa Slide3 de RocScience desde un formato reconocible, en este caso en extensión dxf., previamente, estos archivos fueron generados en Leapfrog Geo 5.0. Para la exportación, se consideraron todas las unidades litológicas reconocidas en campo, y con ayuda de la geología regional del MAGNA 50. Ya cargado el modelo geológico en el programa Slide3, se indican los parámetros geotécnicos de cada unidad litológica con los valores que se indicaran posteriormente. Para este modelo, no se ha considerado nivel freático o piezométrico, ya que en los taludes que bordean este macizo, no se observaron surgencias, y tampoco se observaron pozos piezométricos.

Para que el programa Slide3 ejecute el análisis de estabilidad, este se basa en el método del equilibrio límite, el que consiste en dividir el terreno en bloques, rebanadas o dovelas, y debe cumplir con la ley de la estática. Es muy aplicable para terrenos heterogéneos, para superficies de falla circulares y no circulares, con o sin elementos de estabilización, con presencia de nivel freático (presión de poros), y aceleración sísmica.

5.3. Análisis de estabilidad

Todo resultado del análisis debe obtener factores de seguridad (FS) que garanticen la perpetuación del terreno o su estabilidad en el tiempo ante los agentes naturales que puedan intentar desestabilizarlo.

El factor de seguridad es la relación existente entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento, y las fuerzas motrices que provocan el deslizamiento de un terreno

inestable, por lo expuesto, al tener un $FS < 1$ se considera un terreno inestable, para un $FS = 1$ se considera en estado crítico, y un $FS > 1$ indica que el terreno se encuentra estable (Torrijo et al. 2022).

La presión de agua en el macizo (R_u), fue considerada para cada material de forma individual de acuerdo con valores medios obtenidos de bibliografía, teniendo en cuenta también que esta condición de saturación es para una situación extraordinaria, ya que en la zona las recargas se dan por lluvias estacionarias, las cuales no son tan copiosas, además, no se observaron surgencias que reflejen una presión constante que influya en el material que conforma el macizo.

Para el análisis de estabilidad pseudoestático se utilizó el valor de 0.06 (g) para la aceleración sísmica, siendo este valor, el más adverso. Los métodos utilizados para el análisis fueron:

- Janbu simplificado: se basa en la suposición de que las fuerzas entre las dovelas son horizontales, y no tienen en cuenta las fuerzas cortantes. Considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección. Solo satisface el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales, y no lo hace con el equilibrio de momentos.
- GLE/Morgenstern – Price: Es preciso y riguroso, asume que existe una función que relaciona las fuerzas cortantes y las fuerzas normales entre dovelas. Es aplicable a todas las geometrías y perfiles de terreno. Cumple con todas las condiciones de equilibrio, las de momento y las de fuerzas.

6. RESULTADOS

6.1. Trabajo de campo

Durante la campaña de un día, realizada en marzo de 2024, se identificaron en el acantilado unidades del Grupo Roque Nublo, depósitos del Grupo Post-Roque Nublo y materiales de la Formación Detrítica de Las Palmas. Se verificaron contactos visibles y la geometría general observada fue coherente con la interpretación realizada en Leapfrog.

En total se ejecutaron 1250 impactos de martillo de Schmidt en diferentes unidades litológicas. Los resultados se resumen a continuación:

- Fonolitas (FON): UCS = 109.88 MPa
- Ignimbritas soldadas (IGS) = 25.54 MPa
- Ignimbritas no soldadas (IGNS): UCS = 19.49 MPa
- Pillow lavas: UCS = 40.36 MPa
- Dique andesítico: UCS = 33.11 MPa

La información obtenida no se integró en los cuadros de parámetros utilizados en el análisis en Slide3, tan solo, sirvieron como contraste frente a los valores bibliográficos disponibles para materiales volcánicos de la isla, y los utilizados en el análisis de estabilidad en 2D realizados por Rodríguez-Peces et al. (2013).

6.2. Modelo Geológico

El modelo geológico tridimensional del acantilado de El Rincón se elaboró a partir de la integración de datos de campo, imágenes satelitales y el uso de los programas Google Earth Pro, ArcGIS 10.8, AutoCAD 2022 y Leapfrog Geo 5.0. El modelo refleja la distribución estratigráfica completa, donde se observa en la base la presencia de lavas fonolíticas (FON) del Grupo Fataga, seguidas por ignimbritas no soldadas (IGNS) y soldadas (IGS), la Formación Detrítica de Las Palmas (FDP), las lavas basálticas y basaníticas (B) del Grupo Roque Nublo y, finalmente, los depósitos piroclásticos y tefra del Ciclo Post-Roque Nublo.

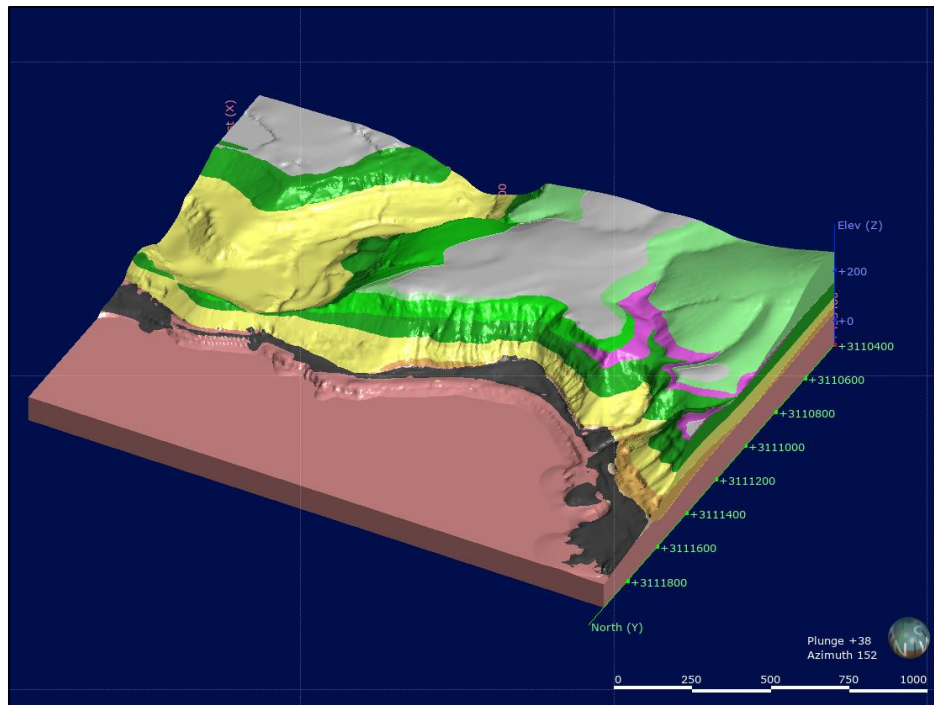


Figura 25: Vista oblicua hacia el sureste del modelo geológico en tres dimensiones, generado con Leapfrog Geo 5.0. Esta visualización permite comprender la disposición interna de las unidades geológicas y su relación espacial dentro del volumen analizado.

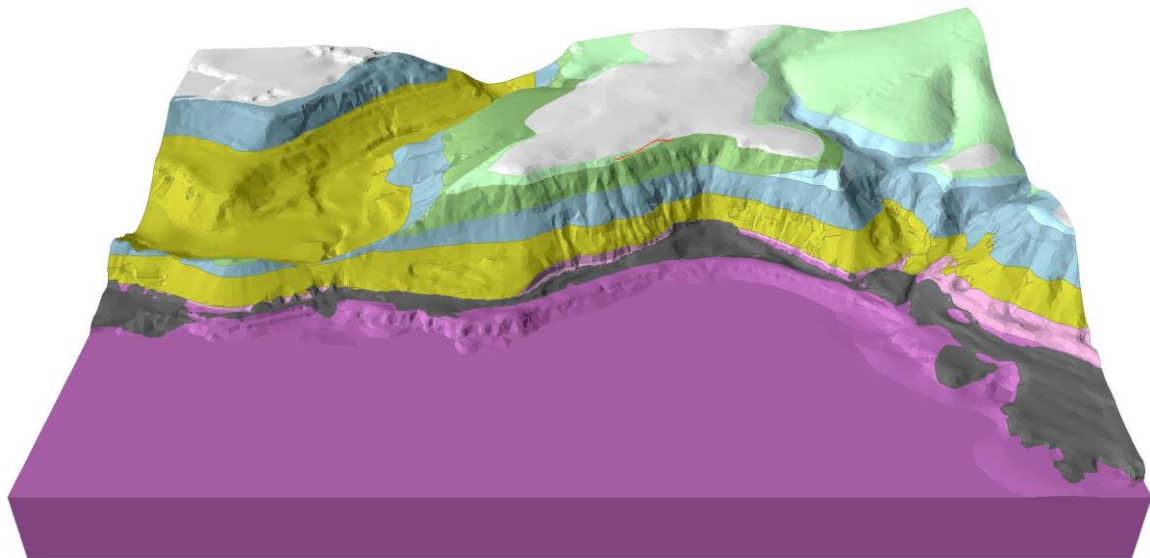
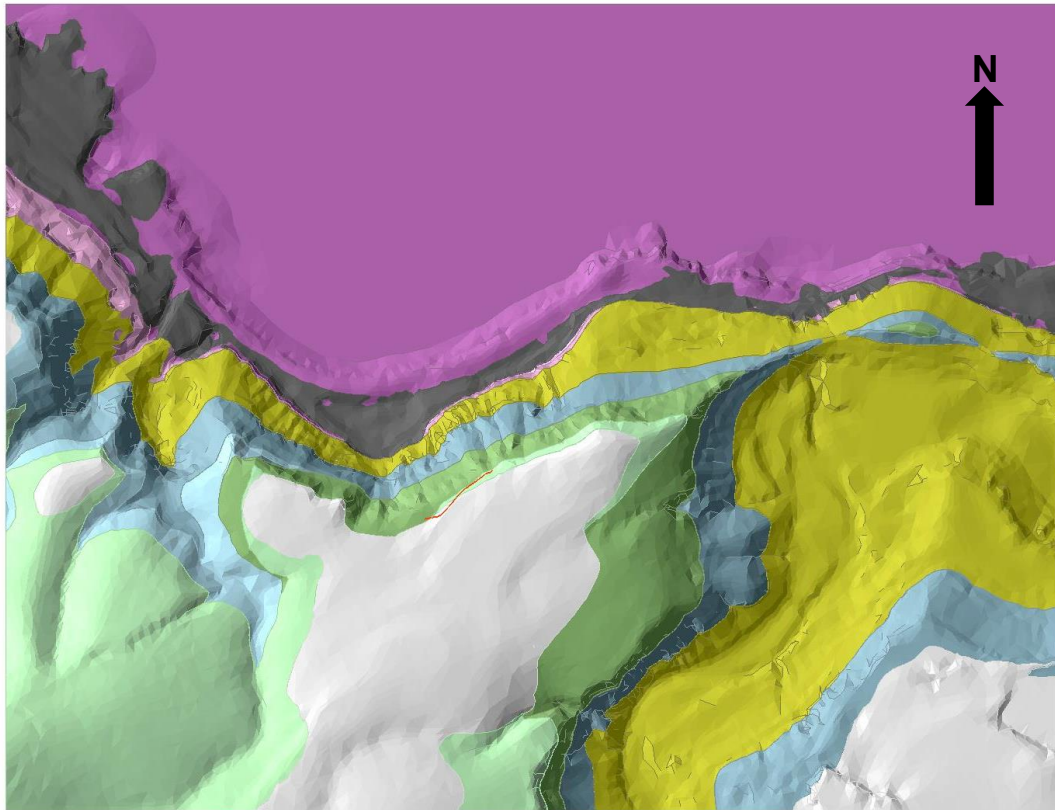












Figura 26. Modelo geotécnico desde una vista oblicua norte-sur. A partir del modelo geológico, se definieron las unidades litológicas con sus respectivas propiedades para el análisis en Slide3.



Espaldón de tierras (Rx)	
Piroclastos alterados (Suelos Actuales)	
Piroclastos de caída (Grupo Post-Roque Nublo)	
Lavas basaníticas (Grupo Post-Roque Nublo)	
Brecha volcánica (Grupo Roque Nublo)	
Lavas basálticas escoriáceas (Grupo Roque Nublo)	
Formación Detrítica de Las Palmas (FDP)	
Ignimbritas fonolíticas soldadas (IGS)	
Tobas e ignimbritas fonolíticas no soldadas (IGNS)	
Lavas fonolíticas	

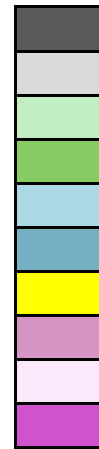


Figura 27. Modelo geotécnico en planta, donde ya se han incorporado los litotipos y sus propiedades mecánicas. Esta vista permite identificar el emplazamiento de los elementos clave del modelo, como los planos de deslizamiento, el límite del talud y las zonas críticas a evaluar.

Los modelos generados revelan la complejidad geológica del talud, con una secuencia litológica compuesta por lavas fonolíticas, ignimbritas no soldadas y soldadas, formación detrítica de Las Palmas, brechas y lavas basálticas del Grupo Roque Nublo, y piroclastos del Ciclo Post-Roque Nublo. La geometría estratigráfica permite identificar contactos inclinados hacia el mar y zonas de interdigitación y acuñaamiento de materiales poco competentes.

6.3. Modelo Geotécnico

Los resultados de los ensayos de esclerómetro mostraron alta dispersión, reflejo de la heterogeneidad del macizo. Las lavas fonolíticas presentaron la mayor resistencia (promedio 109 MPa), mientras que los piroclastos alterados y las ignimbritas no soldadas mostraron valores muy bajos (2 MPa y 19 MPa respectivamente).

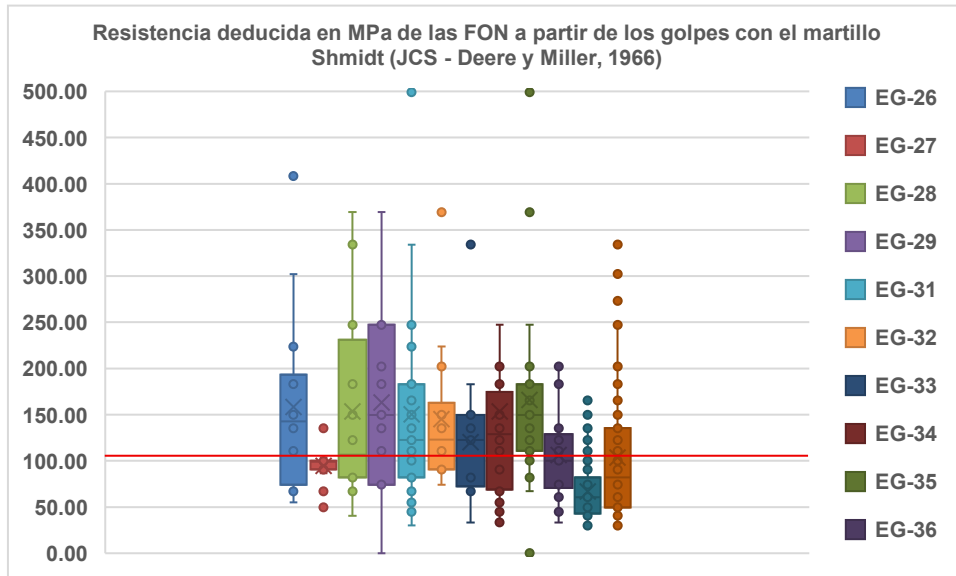


Figura 28. Resultados del ensayo con martillo de Schmidt realizados sobre las lavas fonolíticas (FON). El gráfico tipo box-whisker resume el valor medio, la dispersión y los puntos individuales obtenidos en cada estación. Se incluye además una línea de referencia con el valor medio reportado por Hernández Gutiérrez y Santamarta et al (2015), lo que permite contrastar los datos propios con la bibliografía existente.

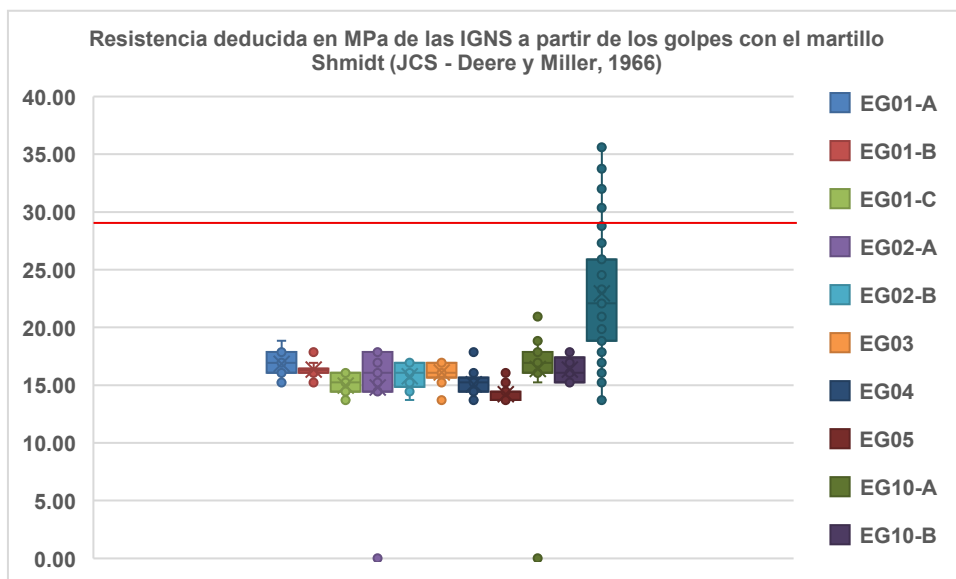


Figura 29. Resultados de los ensayos realizados sobre las ignimbritas no soldadas (IGNS). Al igual que en el caso anterior, se representa la variabilidad de los datos por estación y se compara con el valor promedio referenciado en estudios previos por Hernández Gutiérrez y Santamarta et al (2015).

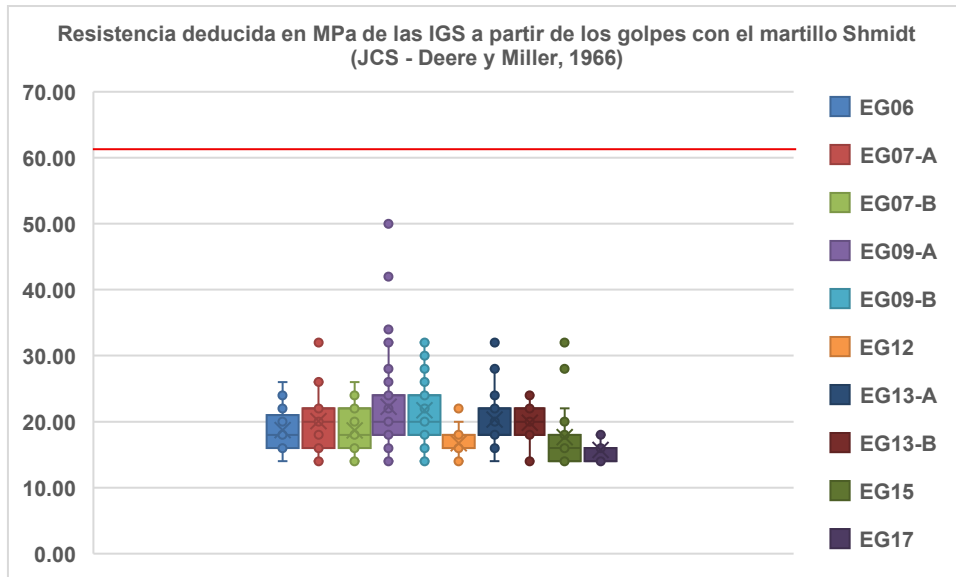


Figura 30. Resultados obtenidos con el martillo de Schmidt sobre las ignimbritas soldadas (IGS). El gráfico muestra la dispersión de valores y su media, comparándolos con los datos publicados en la bibliografía técnica por Hernández Gutiérrez y Santamarta et al (2015), para materiales similares en la isla. Este contraste permite evaluar si los valores locales se ajustan o se desvían de lo esperado.

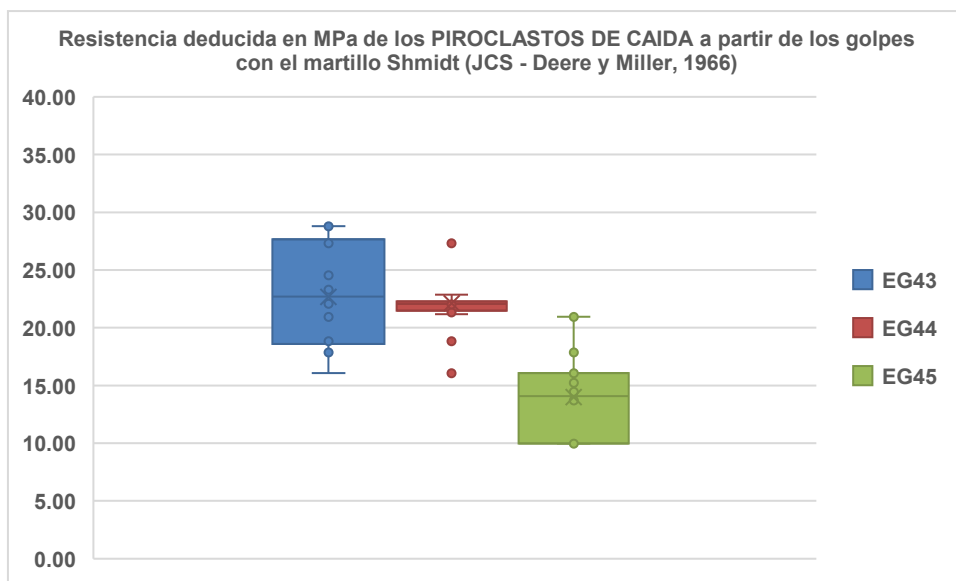


Figura 31. Resultados obtenidos en los piroclastos de caída del Grupo Post-Roque Nublo. Se trata de materiales poco cementados y de baja resistencia, lo cual se refleja en la amplitud de los datos. Esta información se utilizó para comparar con los parámetros mecánicos asignados en el modelo geotécnico.

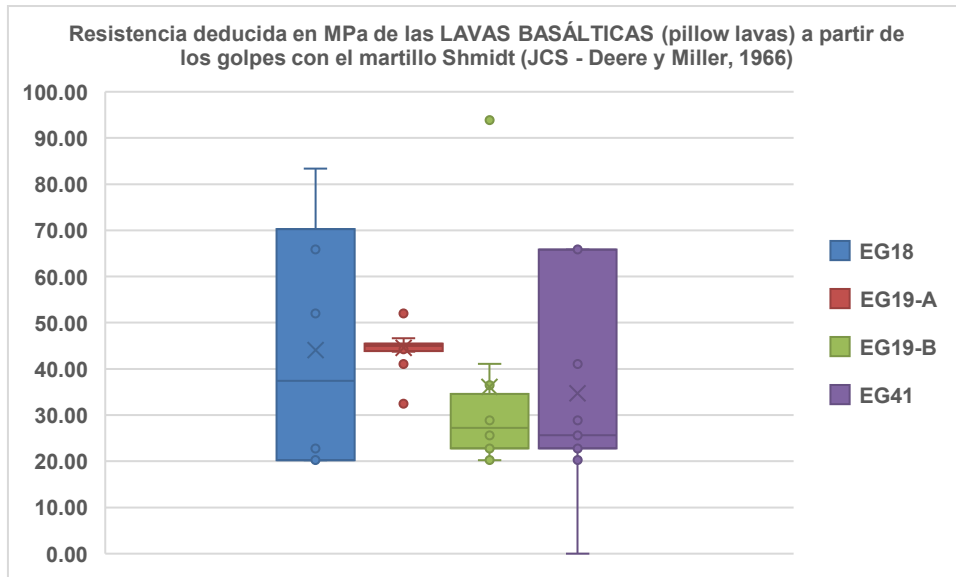


Figura 32. Datos recogidos en las pillow lavas de las lavas basálticas del Grupo Roque Nublo. Estas lavas presentan características estructurales singulares debido a su forma de enfriamiento, lo cual influye en su resistencia. El ensayo permitió caracterizar mejor el comportamiento mecánico de esta unidad, aunque no se haya utilizado para el análisis.

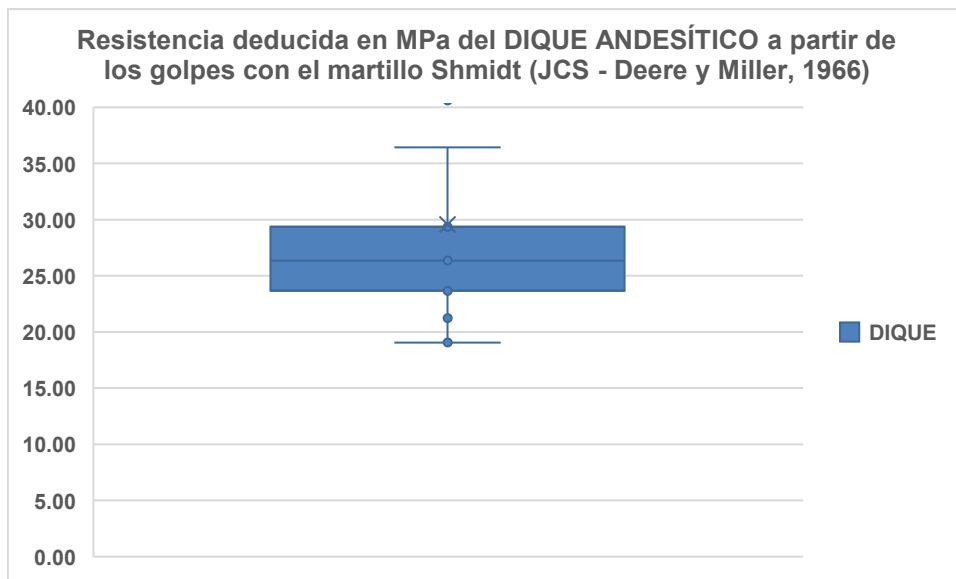


Figura 33. Resultados obtenidos en el dique andesítico. El rango de valores obtenidos es más estrecho que en otras unidades, lo que refleja una homogeneidad estructural mayor. Estos datos sirvieron como información adicional, más no fueron utilizados, ya que no se logró incluir el dique en el modelo.

Litotipos	Cantidad de estaciones geomecánicas	Promedio (MPa)	Valor máximo (MPa)	Valor mínimo (MPa)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
FON	12	109.88	609.95	30.06	81.70	0.74
IGNS	11	19.49	35.59	13.70	5.12	0.26
IGS	10	25.54	46.59	20.47	5.53	0.22
TEFRAS	3	19.46	28.79	9.97	5.41	0.28
LAVAS BASÁLTICAS (PILLOW LAVAS)	4	40.36	105.59	20.24	19.58	0.49
DIQUE ANDESÍTICO	1	33.11	50.38	21.23	10.56	0.32

Tabla 02. Muestra los resultados obtenidos con el martillo de Schmidt en las diferentes estaciones geomecánicas. Se trata de valores de resistencia a compresión uniaxial estimados indirectamente, que fueron fundamentales para caracterizar mecánicamente los litotipos observados en campo. Este trabajo fue ejecutado personalmente durante la campaña de reconocimiento.

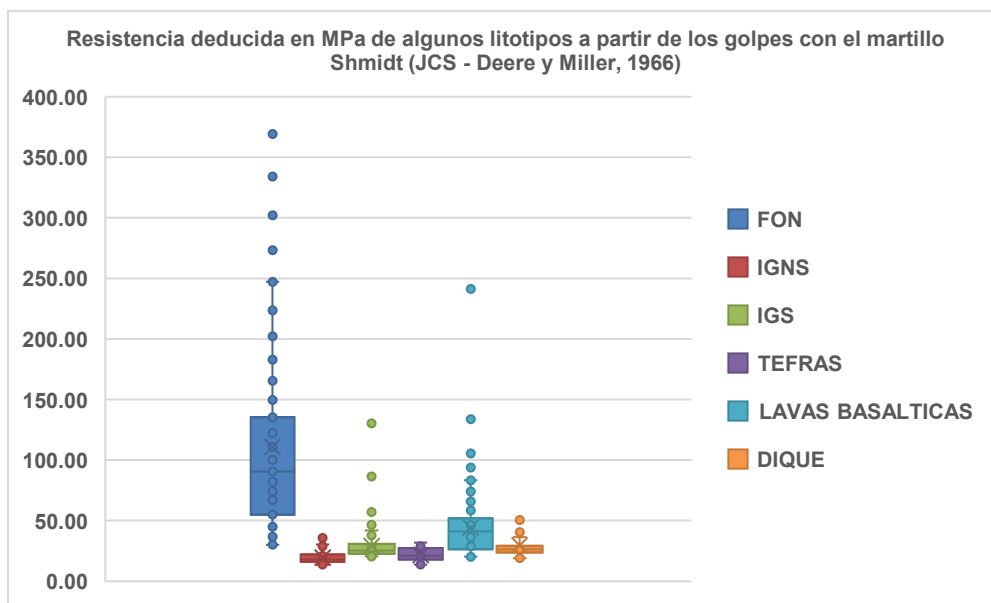


Figura 34. Resumen de los valores obtenidos con el martillo de Schmidt por cada litotipo evaluado. Este gráfico permite una comparación directa entre unidades, mostrando diferencias claras entre materiales más competentes, como las fonolitas, y otros de menor resistencia como los piroclastos.

También se compararon los resultados de los ensayos realizados por Hernández Gutiérrez, Santamarta Cereza et al (2015), los cuales también presentan una desviación estándar amplia (Tabla 03 y figura 35).

Litotipos	Cantidad de muestras	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Desviación estándar	Coefficiente de variación
BOPM	71	82,4	113,8	24,5	20,0	0,243
BOPV	20	47,8	93,2	6,9	30,2	0,633
BPLV	1	50,0	-	-	-	-
BPLM	6	39,7	54,9	22,1	12,5	0,315
BAFV	11	58,0	83,4	17,2	23,6	0,407
BAFM	12	79,3	96,1	39,7	16,4	0,207
TRQ	15	79,6	107,9	34,3	18,7	0,235
FON	20	85,4	114,7	29,9	24,0	0,282
IGNS	9	29,3	56,4	6,9	20,4	0,697
IGS	21	61,4	93,2	22,1	21,8	0,354

Tabla 03. se recogen los valores medios de resistencia a compresión simple para diversos litotipos volcánicos presentes en Canarias, según la literatura técnica consultada. Estos datos sirvieron como referencia para contrastar los resultados obtenidos en campo, aportando un marco de comparación útil para validar las estimaciones realizadas. Hernández Gutiérrez, Santamarta et al (2015).

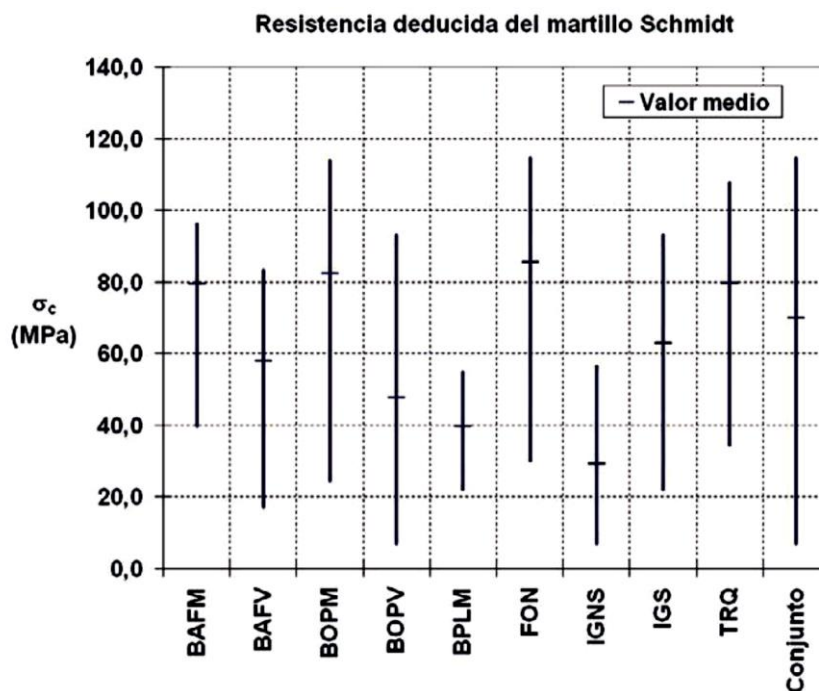


Figura 35. Valores medios de resistencia por litotipo tomados de la bibliografía especializada para materiales volcánicos de Canarias (Hernández Gutiérrez y Santamarta et al - 2015). Esta información se utilizó como referencia para evaluar la validez de los resultados obtenidos en campo y para contrastarlos con las condiciones locales.

Por tal motivo, se utilizaron los datos del trabajo realizado por Rodríguez-Peces et al. (2013).

Material	Propiedad	Media	Min	Max	Ru rangos	Ru medio
Lavas fonolíticas	y (kN/m ³)	24.0	19.0	29.0	0.00 – 0.15	0.075
	RCS (MPa)	109.0	47.0	171.0		
	GSI	65.0	55.0	75.0		
	mi	25.0	20.0	30.0		
Ignimbritas fonolíticas soldadas (IGS)	y (kN/m ³)	21.0	13.0	29.0	0.00 – 0.10	0.05
	RCS (MPa)	48.0	18.0	78.0		
	GSI	65.0	55.0	75.0		
	mi	19.0	16.0	22.0		
Tobas e ignimbritas fonolíticas no soldadas (IGNS)	y (kN/m ³)	13.0	8.0	18.0	0.15 – 0.35	0.25
	RCS (MPa)	16.0	3.0	29.0		
	GSI	30.0	20.0	40.0		
	mi	13.0	8.0	18.0		
Formación Detrítica de Las Palmas (FDP)	y (kN/m ³)	22.0	18.0	26.0	0.10 – 0.30	0.20
	c (kPa)	91.0	84.0	98.0		
	φ	36.0	35.0	37.0		
Lavas basálticas escoriáceas (Grupo Roque Nublo)	y (kN/m ³)	21.0	13.0	26.0	0.05 – 0.15	0.10
	RCS (MPa)	42.0	1.0	84.0		
	GSI	30.0	30.0	30.0		
	mi	25.0	20.0	30.0		
Brecha volcánica (Grupo Roque Nublo)	y (kN/m ³)	21.5	20.5	22.5	0.05 - 0.35	0.20
	RCS (MPa)	2.8	0.5	5.0		
	GSI	42.5	30.0	55.0		
	mi	17.5	15.0	20.0		
Lavas basaníticas (Grupo Post-Roque Nublo)	y (kN/m ³)	26.0	22.0	30.0	0.00 – 0.10	0.05
	RCS (MPa)	103.0	45.0	161.0		
	GSI	50.0	30.0	70.0		
	mi	25.0	20.0	30.0		
Piroclastos de caída (Grupo Post-Roque Nublo)	y (kN/m ³)	13.0	7.0	18.0	0.15 – 0.35	0.25
	RCS (MPa)	2.4	0.4	11.4		
	GSI	25.0	20.0	30.0		
	mi	13.0	8.0	18.0		
Piroclastos alterados (Suelos Actuales)	y (kN/m ³)	13.0	11.0	15.0	0.20 - 0.40	0.30
	RCS (MPa)	2.0	1.9	2.3		
	GSI	10.0	5.0	15.0		
	mi	13.0	8.0	18.0		
Espaldón de tierras (Rx)	y (kN/m ³)	19.0	19.0	19.0	0.10 - 0.40	0.25
	c (kPa)	80.0	80.0	80.0		
	φ	35.0	35.0	35.0		

Tabla 04. Esta tabla resume las propiedades geotécnicas asignadas a cada litotipo en el modelo de estabilidad. Incluye parámetros como peso específico, resistencia a compresión simple, GSI, cohesión y ángulo de fricción interna, entre otros. Los valores se han tomado de referencias reconocidas y adaptado según el tipo de material observado en campo y los resultados de ensayo. (González de Vallejo et al., 2005 y 2008; Rodríguez-Losada et al., 2009; Serrano et al., 2007; Rodríguez-Peces et al., 2013). y: peso específico, RCS: resistencia a compresión simple, GSI: Geological Strength Index (Marinos et al., 2005), mi: constante para roca sana (Hoek et al., 2002), c: cohesión, φ: ángulo de rozamiento interno, Min: valores mínimos, Max: valores máximos. Los valores del coeficiente R_u se estiman según las características geotécnicas descritas en las fuentes consultadas, pero pueden variar mucho dependiendo de las condiciones del terreno (como saturación, compactación o fracturas).

A partir de la información recopilada en campo y del modelo geológico generado en Leapfrog Geo 5.0, se construyó el modelo geotécnico en Slide3, con el objetivo de realizar un análisis de estabilidad tridimensional del acantilado.

La geometría general del talud fue importada desde Leapfrog como superficie topográfica. Luego se definieron las diferentes unidades litológicas según su continuidad, propiedades y comportamiento mecánico observado. A cada una de ellas se le asignaron los parámetros de los datos del trabajo realizado por Rodríguez-Peces et al. (2013). El modelo se adecuó para evaluar tanto escenarios estáticos como pseudoestáticos. Se utilizaron dos métodos de cálculo: Janbu Simplificado y GLE-Morgenstern Price, con y sin presión intersticial (Ru), para representar distintos escenarios.

6.4. Análisis de estabilidad

En el análisis de estabilidad, los factores de seguridad (FS) obtenidos variaron según el método y las condiciones impuestas. En condiciones estáticas sin presión de poros, los FS superan en general la unidad, especialmente en las zonas superiores formadas por unidades más competentes. Sin embargo, al considerar presión intersticial o cargas sísmicas, los FS disminuyen drásticamente, identificándose zonas críticas principalmente en sectores compuestos por IGNS, FDP, tefras y suelos residuales.

Jambu Simplificado						
Valores	Sin Ru					
	Estático			Pseudo		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Media	1.278	1.437	1.482	1.070	1.180	1.293
Min	0.548	0.941	1.039	0.490	0.595	0.734
Max	1.264	1.457	1.489	1.133	1.303	1.336
Valores	Con Ru					
	Estático			Pseudo		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Media	0.881	1.063	1.122	0.744	0.900	0.937
Min	0.329	0.579	0.583	0.291	0.487	0.519
Max	0.806	1.083	1.047	0.736	0.931	1.084

Tabla 05. Factores de seguridad calculados para cada litotipo mediante el método de Janbu Simplificado, considerando tanto condiciones estáticas como pseudoestáticas, y comparando escenarios con y sin presión intersticial (Ru). Se presentan los valores mínimo, máximo y promedio obtenidos, lo que permite evaluar la sensibilidad del sistema a cada condición.

El análisis de estabilidad se realizó mediante los métodos de Janbu Simplificado y GLE/Morgenstern-Price, considerando escenarios estáticos y pseudoestáticos, con y sin presencia de presión de poros (Ru), para escenarios extremos, con la finalidad de identificar zonas susceptibles. Los resultados obtenidos por ambos métodos delimitan

zonas, en su mayoría 3 zonas, en algunos casos 2, o, las zonas se cruzan o son parte una de otra, para factores de seguridad mínimos.

GLE - Morgenstern Price						
Valores	Sin Ru					
	Estático			Pseudo		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Media	1.301	1.560	1.560	1.215	1.332	1.428
Min	0.609	0.934	1.093	0.560	0.634	0.804
Max	1.323	1.566	1.616	1.200	1.440	1.452
Valores	Con Ru					
	Estático			Pseudo		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Media	0.923	1.191	1.235	0.897	1.041	1.074
Min	0.368	0.631	0.802	0.332	0.574	0.800
Max	0.902	1.184	1.231	0.845	1.111	

Tabla 06. Presenta los factores de seguridad obtenidos mediante el método de GLE – Morgenstern Price, evaluando distintos escenarios: con y sin presión intersticial (Ru), y bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Se reportan los valores promedio, mínimo y máximo por cada litología modelada, lo que permite analizar el comportamiento diferencial del talud frente a diferentes hipótesis de carga y saturación.

Las superficies de rotura simuladas bajo condiciones extremas afectan principalmente al tercio central e inferior del talud, lo que no concuerda con la distribución de las grietas observadas históricamente. En algunos casos, las zonas de rotura abarcan bloques de gran volumen, implicando potenciales riesgos para la infraestructura vial en caso de eventos desencadenantes como lluvias excepcionales o sismos.

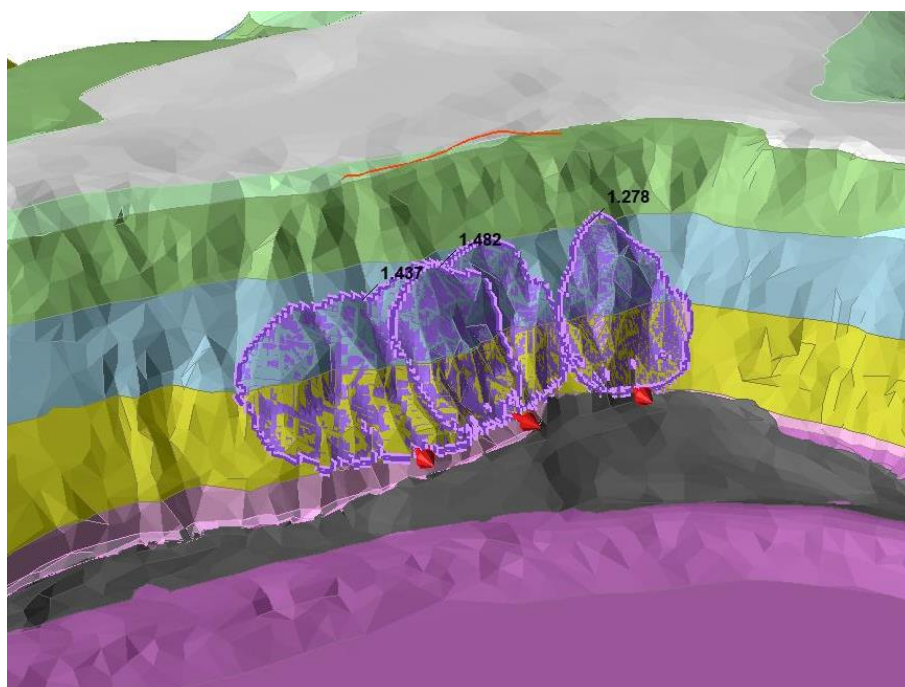


Figura 36. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de Janbu Simplificado en estado estático, sin considerar presión intersticial ($R_u = 0$). Las zonas de fallo afectan principalmente a la Formación Detrítica de Las Palmas y las lavas basálticas del Grupo Roque Nublo.

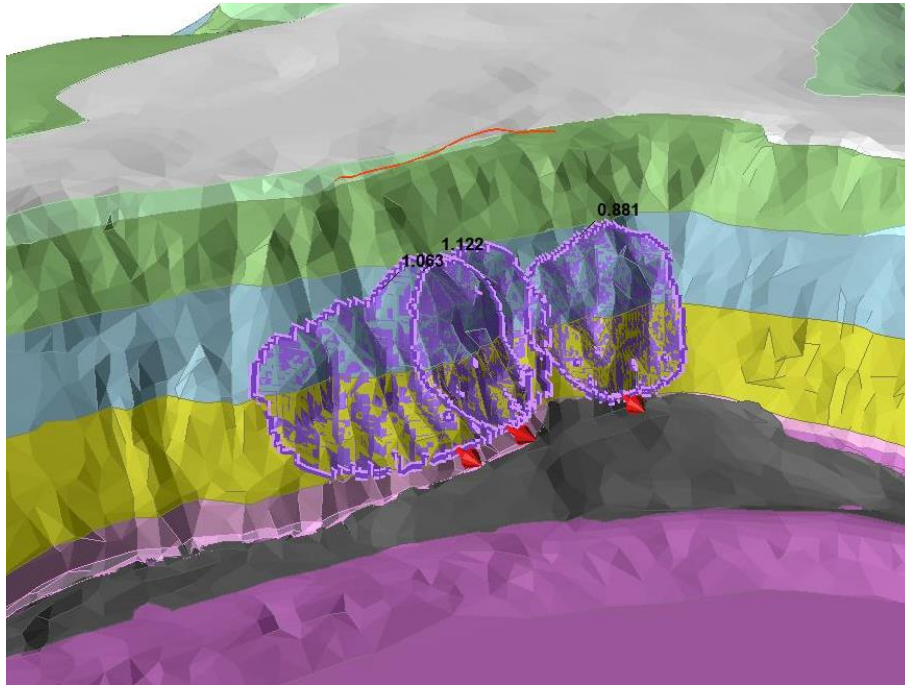


Figura 37. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de Janbu Simplificado en estado estático, con presión intersticial ($R_u = a$ un valor asignado en cada litotipo). Las zonas de fallo abarcan las lavas basálticas y la Formación Detrítica de Las Palmas.

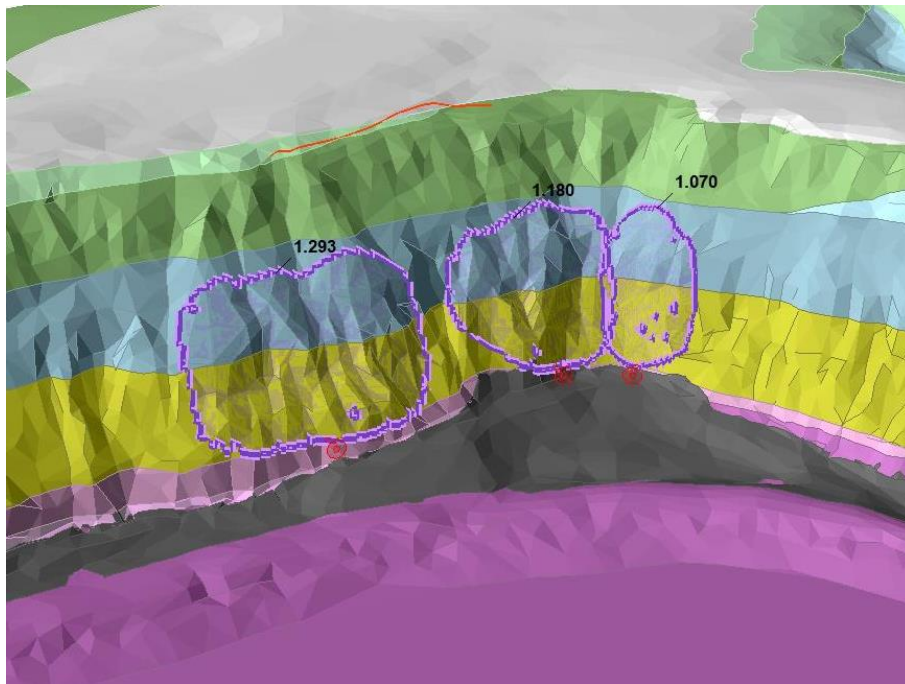


Figura 38. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de Janbu Simplificado en estado pseudoestático, sin considerar presión intersticial ($R_u = 0$). Las zonas abarcan las lavas basálticas, la Formación Detrítica de Las Palmas, y las ignimbritas soldadas.

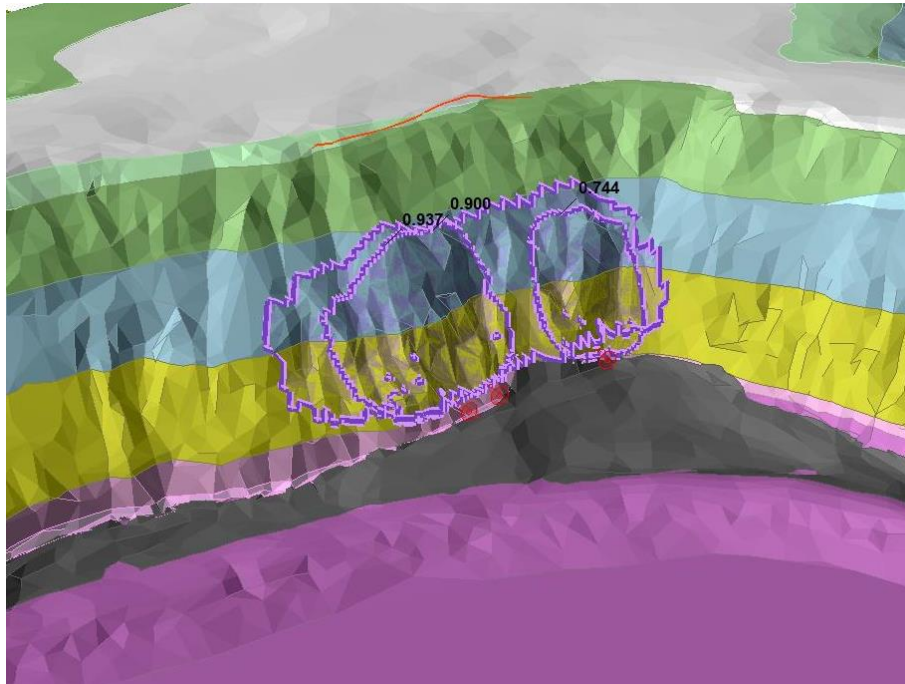


Figura 39. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de Janbu Simplificado en estado pseudoestático, con presión intersticial ($R_u = a$ un valor asignado en cada litotipo). Las zonas abarcan las lavas basálticas y la Formación Detrítica de Las Palmas.

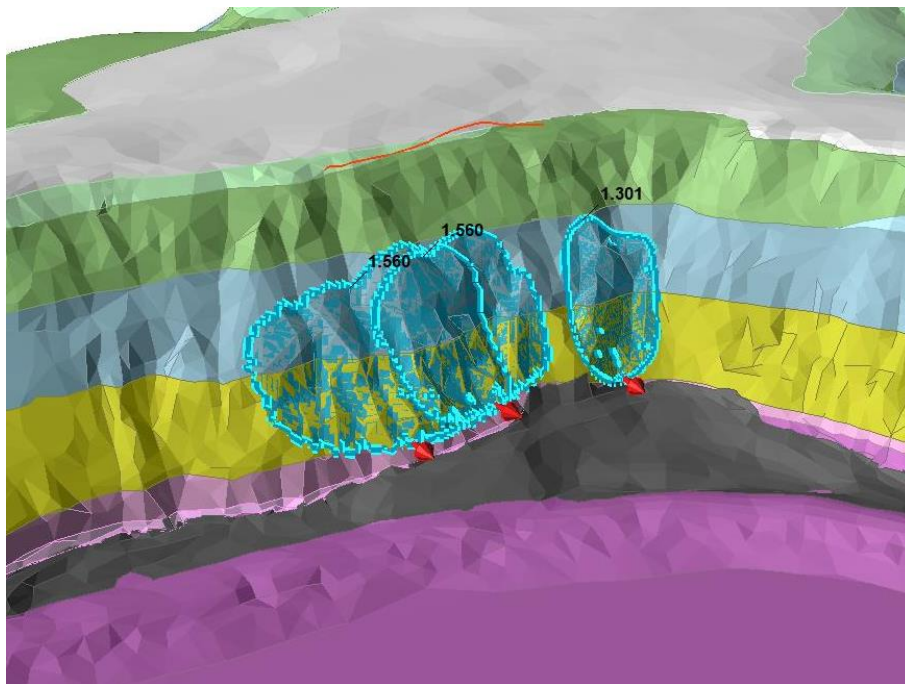


Figura 40. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de GLE – Morgenstern Price en estado estático, sin considerar presión intersticial ($R_u = 0$). Las zonas abarcan las lavas basálticas, la Formación Detrítica de Las Palmas, y las ignimbritas soldadas.

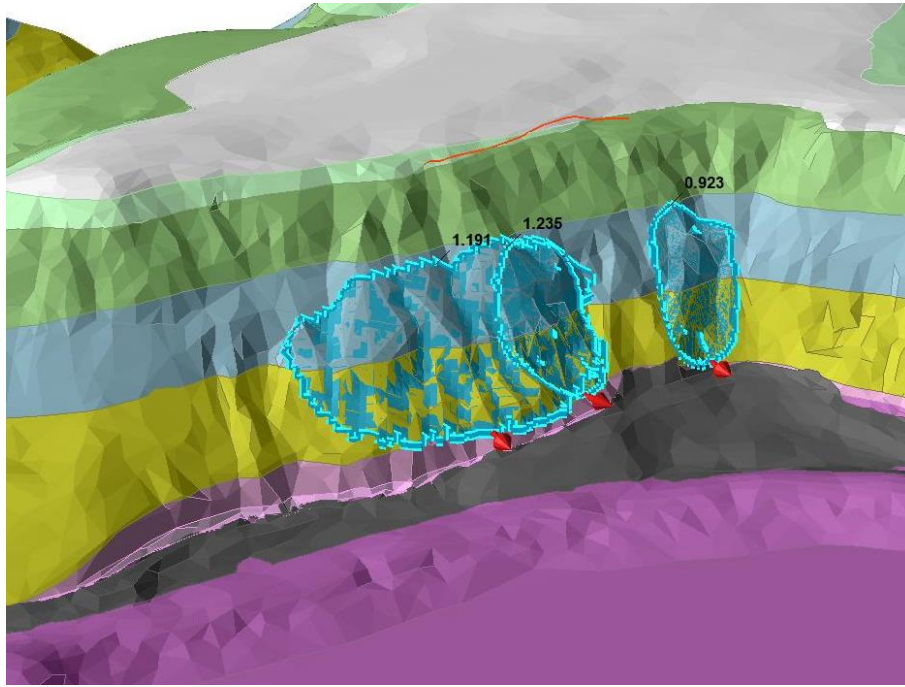


Figura 41. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de método GLE – Morgenstern Price en estado estático, con presión intersticial ($R_u = a$ un valor asignado en cada litotipo). Las zonas abarcan las lavas basálticas, la Formación Detrítica de Las Palmas, y las ignimbritas soldadas.

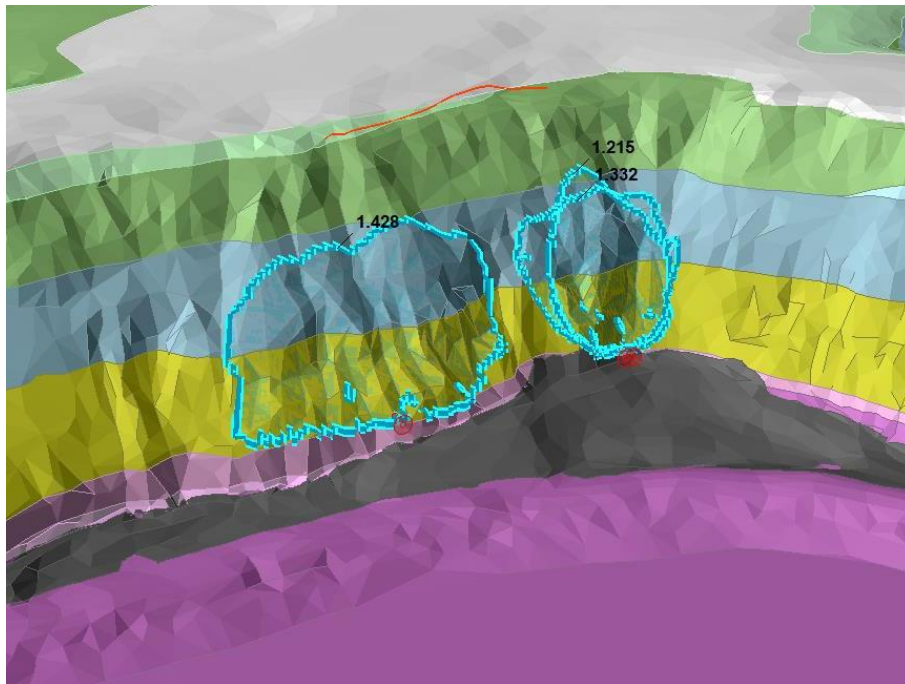


Figura 42. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de método GLE – Morgenstern Price en estado pseudoestático, sin presión intersticial ($R_u = 0$). Las zonas abarcan las lavas basálticas, la Formación Detrítica de Las Palmas, y las ignimbritas soldadas.

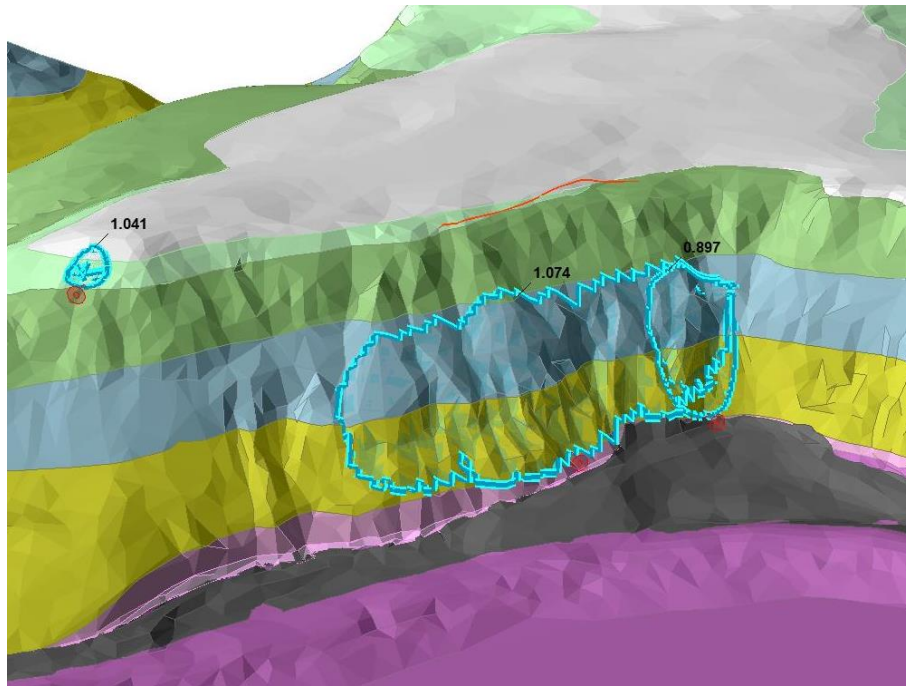


Figura 43. Superficies de deslizamiento obtenidas con el método de método GLE – Morgenstern Price en estado pseudoestático, con presión intersticial ($R_u = a$ un valor asignado en cada litotipo). Las zonas abarcan las lavas basálticas, la Formación Detrítica de Las Palmas, y las ignimbritas soldadas

Los resultados con el método de Janbu Simplificado, nos muestra valores bastante conservadores, en comparación con los de GLE - Morgenstern Price. Se destaca que con el material con presión intersticial (R_u), los F.S. bajan considerablemente, al igual que adicionando aceleración sísmica. Las áreas y volúmenes de deslizamiento que se generaron en cada análisis muestran con precisión las zonas susceptibles a deslizarse bajo las condiciones extremas analizadas.

7. DISCUSIÓN

El análisis de estabilidad tridimensional realizado en este trabajo permite obtener una visión más precisa del comportamiento geotécnico del acantilado de El Rincón frente a distintos escenarios. A diferencia de estudios previos, que se limitaron a representaciones en dos dimensiones y a estimaciones sobre datos bibliográficos, aquí se ha integrado cartografía detallada, ensayos in situ (que por su dispersión no se utilizaron) y modelización geológica y geotécnica 3D, lo que refuerza la validez de los resultados obtenidos.

Los factores de seguridad (FS) calculados muestran un comportamiento estable en condiciones normales, es decir, sin presión de poros ni aceleración sísmica, cosa que refleja el estado actual estable del acantilado. Sin embargo, al introducir presión intersticial (R_u) y cargas sísmicas, se observa una disminución significativa de los FS, llegando incluso a valores por debajo de la unidad en algunos sectores. Esto indica que bajo condiciones extremas —aunque poco frecuentes— el acantilado podría comportarse de forma inestable, especialmente en las zonas donde afloran litologías más débiles como las tefras, las lavas basálticas, y la Formación Detrítica de Las Palmas (FDP), pero contradictoriamente no por la grieta principal, que se encuentra en la parte alta o coronación del acantilado.

La comparación con los análisis anteriores, como los realizados por Fariñas (1991) o Rodríguez-Peces et al. (2013), pone de manifiesto la evolución metodológica aplicada al estudio del acantilado. Los modelos 2D utilizados en esos trabajos, aunque útiles como aproximación preliminar, se basaban en secciones idealizadas que simplificaban tanto la geometría como la distribución de materiales en el talud. Esto limitaba la capacidad de identificar volúmenes inestables con formas complejas o con direcciones de deslizamiento no perpendiculares al perfil analizado.

En cambio, el presente estudio ha utilizado un modelo tridimensional que procura replicar fielmente la topografía real a partir de datos de campo y reconstrucción geológica. Esto ha permitido analizar múltiples trayectorias de fallo simultáneamente, sin restringir el análisis a una sección fija, y detectar superficies de rotura potencial que no habrían sido evidentes en los modelos 2D. Además, el cálculo del factor de seguridad se ha realizado considerando variaciones espaciales en el terreno y diferencias litológicas más realistas, lo cual mejora la interpretación del comportamiento global del macizo.

En este sentido, la afirmación de que “el análisis 3D contribuye a comprender este equilibrio con mayor claridad” queda justificada por la capacidad del modelo para

representar escenarios más próximos a la realidad, lo que proporciona una base técnica más robusta para evaluar el riesgo y planificar medidas de intervención o monitoreo a largo plazo.

A nivel cualitativo, la probabilidad de rotura puede considerarse baja en condiciones normales, pero se incrementa sensiblemente en presencia de agua en el terreno o movimientos sísmicos, especialmente en sectores donde la litología tiene menor cohesión y mayor porosidad. Este enfoque permite establecer un criterio técnico para priorizar futuras acciones de monitoreo o intervención. El modelo empleado presenta, sin embargo, ciertas limitaciones. La ausencia de sondeos reales implica que las interpretaciones en profundidad están basadas en extrapolaciones a partir de afloramientos superficiales. Si bien los perfiles construidos son coherentes con la geología regional, se recomienda que futuros estudios incorporen perforaciones y ensayos de laboratorio para ajustar aún más los parámetros empleados.

Este trabajo permite sostener que el acantilado de El Rincón mantiene un equilibrio precario o al límite condicionado por su composición litológica y su historia. El análisis 3D contribuye a comprender este equilibrio con mayor claridad, proporcionando una base más sólida para la gestión del riesgo y la planificación de medidas de estabilidad a largo plazo.

8. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo de este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

1. Se ha logrado modelar con relativa precisión la geometría geológica del acantilado de El Rincón a través de herramientas tridimensionales, permitiendo una modelización más ajustada del macizo rocoso que supera las limitaciones de estudios previos en 2D.
2. El análisis de estabilidad revela que el talud se encuentra en una condición estable límite bajo escenarios actuales (sin presión de poros y sin aceleración sísmica). No obstante, bajo condiciones extremas —como presencia de agua en el terreno o aceleración sísmica— el factor de seguridad disminuye significativamente, especialmente en sectores con litologías de baja resistencia, alcanzando valores críticos ($FS < 1$), lo que implica un potencial riesgo de deslizamiento.
3. Las unidades más susceptibles a fallos son las ignimbritas no soldadas (IGNS), los depósitos piroclásticos alterados, la Formación Detrítica de Las Palmas (FDP) y los niveles de suelos residuales. Estas unidades presentan menor cohesión, alta porosidad y mayor sensibilidad frente a variaciones en el contenido de humedad o esfuerzos inducidos.
4. La modelización tridimensional mediante Leapfrog y Slide3 ha resultado una metodología eficaz para simular las condiciones reales del talud y del macizo y prever mecanismos de fallo más representativos. Este enfoque contribuye a optimizar la evaluación de riesgos y el diseño de estrategias de estabilización o sobre todo prevención.
5. Este trabajo, invita a ampliar el conocimiento geológico local, para complementar y afinar la cartografía regional disponible (MAGNA 40 y 50), y estableciendo un marco técnico útil para futuras investigaciones en la zona.

También cabe destacar las limitaciones y recomendaciones para mejorar o desarrollar este tema:

- La principal limitación del trabajo radica en la ausencia de sondeos geotécnicos reales, lo que obliga a basar la caracterización en observaciones superficiales y datos indirectos. Esta limitación afecta la certeza en la distribución litológica en profundidad y los valores de los parámetros geomecánicos.

- Se recomienda ejecutar campañas de perforación y más ensayos de campo y de laboratorio para obtener parámetros más representativos y reducir la incertidumbre del modelo.
- Sería conveniente implementar un programa de monitoreo permanente de grietas y deformaciones, especialmente en las zonas identificadas como críticas, así como considerar la posibilidad de instalar instrumentación geotécnica que permita registrar la evolución del macizo en tiempo real.
- Para evaluar la respuesta del talud ante eventos extremos, sería valioso realizar simulaciones numéricas acopladas que consideren la interacción hidráulico-mecánica de los materiales, y modelar posibles escenarios de sismo-pluviosidad combinados.
- Para el cartografiado global del talud a detalle, se recomienda el uso de fotografías con drones, y fotogrametría para el levantamiento topográfico a detalle, y así poder ajustar el actual modelo geológico.

En conclusión, el acantilado de El Rincón muestra una estabilidad condicionada que podría verse comprometida en situaciones excepcionales. La aplicación de modelos 3D ha permitido detectar con mayor precisión las zonas de riesgo, y constituye un paso firme hacia una gestión geotécnica más eficiente.

9. BIBLIOGRAFIA

- Carracedo, J.C., & Troll, V.R. (2013). *The Geology of the Canary Islands*. Elsevier, Amsterdam.
- Coello, J., Ancochea, E., Casquet, C., Hernán, F., Fuster, J.M., & Ibarrola, E. (1991). Chronology of the volcanic activity and evolution of the Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *Geological Magazine*, 128(5), 415–422. <https://doi.org/10.1017/S0016756800018824>
- Domenico, P.A., & Schwartz, F.W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Freeze, R.A., & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson-Prentice Hall, Madrid.
- González Losa, F.J., Pérez Torrado, J.C., & Lomoschitz Mora Figueroa, A. (2004). Aproximación al comportamiento geotécnico de las ignimbritas ash and pumice a partir de análisis químico-mineralógicos. *Geo-Temas*, 6(3).
- Hernández Gutiérrez, L.E., & Santamarta Cerezal, J.C. (2015). *Ingeniería geológica en terrenos volcánicos: Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias*. Fundación Mapfre Guanarame, Tenerife.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd ed.). The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., & Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hoek, E., & Brown, E.T. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. RocScience. <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Hoek-Brown-Criterion-2002.pdf> [Consulta: julio de 2025]
- IGME (1994). *Mapa Geológico de España, Hoja 1113-III Las Palmas, y Memoria Explicativa*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/> [Consulta: julio de 2025]
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). Catálogo de terremotos locales. <https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos> [Consulta: julio de 2025]
- MACASTAB (2019). *Guías geotécnicas para terrenos volcánicos en Canarias*. SEMSIG. https://semsig.org/wpcontent/uploads/2019/06/B_196_GuiasGeotecnicas.pdf [Consulta: julio de 2025]
- María del Carmen Cabrera Santana, & Custodio Gimena, E. (2008). *Hidrogeología y recursos hídricos en Gran Canaria*. Cabildo Insular de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria.
- Martín-González, F., & Hernández-Calvento, L. (1992). Facies y evolución sedimentológica de la Formación Detrítica de Las Palmas (NE de Gran Canaria). *Anuario de Estudios Atlánticos*, 38, 81–90. <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/1045/1/2504.pdf>
- Ministerio de Fomento (2002). *NCSE-02. Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación*. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Pérez Torrado, F.J., Carracedo, J.C., & Mangas, J. (2002). *Geología de Canarias. Volumen I: Geología de las Islas Occidentales*. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), Santa Cruz de Tenerife.
- Rodríguez-Peces, M.J., Yepes, J., & Cabrera Fuentes, C. (s.f.). Posible interrupción de la autovía GC-2 (Gran Canaria) por deslizamientos y

desprendimientos rocosos: Análisis de estabilidad del acantilado de El Rincón. Simposio Taludes 2013.

- Terzaghi, K., Peck, R.B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- UNE-EN 1998-1:2011. *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificios*. AENOR.