

POSIBLE INTERRUPCIÓN DE LA AUTOVÍA GC-2 (GRAN CANARIA) POR DESLIZAMIENTOS Y DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL ACANTILADO DE EL RINCÓN

MARTÍN JESÚS RODRÍGUEZ-PECES^{1*}, JORGE YEPES², CARLOS CABRERA FUENTES²

¹ Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040. Madrid.
martinjr@geo.ucm.es

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017. Las Palmas.

RESUMEN

En este trabajo se han identificado los deslizamientos y desprendimientos que se pueden desarrollar en el acantilado de El Rincón (Gran Canaria) y sus repercusiones sobre la Autovía GC-2, en la base del acantilado. El análisis de estabilidad realizado para las condiciones actuales indica que la ladera es estable. El análisis a largo plazo considera el sustrato saturado en agua y se limita a los dos bloques rocosos más susceptibles de experimentar deslizamiento: uno a media ladera y otro en coronación. El deslizamiento del bloque de coronación parece más probable ya que sólo requiere la saturación de los piroclastos y está favorecido por la progresiva apertura de la grieta subvertical. Por último, la evaluación de los desprendimientos rocosos que afectan al acantilado indica que los bloques no alcanzarían la calzada de la autovía GC-2; sino que se acumularían en los conos de deyección presentes al pie de la ladera.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analiza las potenciales inestabilidades de ladera (deslizamientos y desprendimientos rocosos) que se pueden desarrollar en el acantilado de El Rincón (N de Gran Canaria, Islas Canarias) y se estudian las posibles repercusiones de estas inestabilidades sobre un tramo de la Autovía GC-2, localizada en la base del acantilado (Fig. 1). Este estudio tiene

su relevancia ya que la GC-2 es la principal vía de acceso a Las Palmas de Gran Canaria por el norte de la isla.

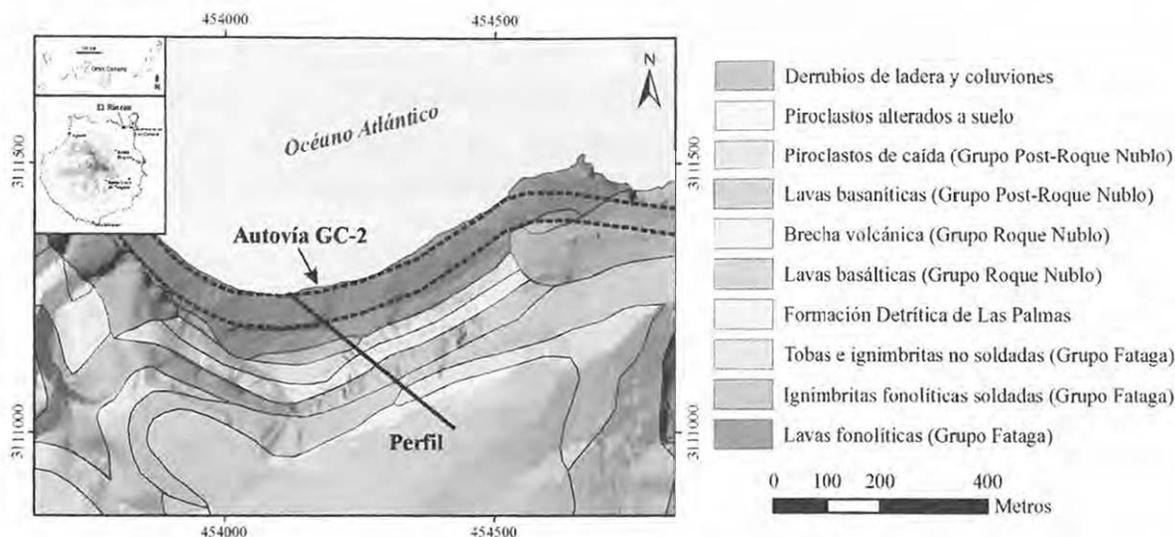


Figura 1. Mapa litológico del acantilado de El Rincón (Gran Canaria) basado en los mapas geológicos del Instituto Geológico y Minero de España (Balcells y Barrera, 1987). Se indica la traza de la autovía GC-2 (línea discontinua) y el perfil geotécnico (cf. figuras 2 y 3).

Previamente a la construcción de la GC-2, la carretera antigua estaba encajada entre el pie del acantilado de El Rincón y el mar. Durante su construcción, en el año 1944, se produjo un gran deslizamiento en los materiales del pie de la ladera que afectó a la carretera. También era frecuente la interrupción del tráfico debido a la caída de rocas provenientes del talud. En el año 1985, durante la construcción de la variante, se procedió a la extracción del pie de monte de la base del acantilado. Como consecuencia de esta actuación, aparecieron algunas grietas de gran longitud (cientos de metros) en la coronación y en la ladera del acantilado. Estas grietas han sido controladas en dos periodos para medir la evolución de su apertura: de 1986 a 1991 (Fariña, 1991) y de 2001 a 2012 (Cabrera Fuentes, 2013). Los resultados obtenidos indican que la mayoría de las grietas han aumentado su extensión superficial y profundidad en unas decenas de metros y que han experimentado un ensanchamiento decimétrico. A pesar de que estas grietas se pueden considerar activas en la actualidad, no se ha producido deslizamiento alguno. Sin embargo, el hecho de que el movimiento continúe activo es indicativo de que la ladera no está en equilibrio, por lo que convendría estudiar su comportamiento a largo plazo. Si se produjese un deslizamiento a favor de estas grietas, la GC-2 se vería afectada en gran medida ya que provocarían su bloqueo inmediato.

A parte de la inestabilidad de grandes masas, en el acantilado de El Rincón también se puede observar un gran número de bloques rocosos potencialmente inestables, que podrían generar numerosos desprendimientos. De hecho, en la base de la ladera se puede observar coluviones desarrollados a partir de desprendimientos previos. Estos bloques tienen tamaños entre unos

pocos metros a varios cientos de metros cúbicos, por lo que existe el peligro de que alguno pueda alcanzar la GC-2.

Teniendo en cuenta esta información, se ha evaluado la estabilidad frente al deslizamiento del acantilado de El Rincón. Para ello, se han considerado diferentes factores que pueden contribuir a su desestabilización: reducción de los parámetros resistentes por alteración, aumento de la presión intersticial por saturación de agua, sismicidad, etc. Por otra parte, también se ha evaluado la susceptibilidad frente a los desprendimientos, con objeto de definir las zonas donde podrían alcanzar la autovía. Estos estudios de estabilidad permitirán proponer medidas preventivas o correctoras que eviten la interrupción de la Autovía GC-2.

2. METODOLOGÍA

A partir del perfil topográfico y la información geológica y geomorfológica disponible se ha realizado un modelo geológico-geotécnico del acantilado de El Rincón. En dicho modelo se han considerado varios bloques potencialmente inestables definidos por la intersección de las grietas de tracción observadas y diferentes superficies basales de rotura. La caracterización geotécnica de los materiales presentes en la ladera ha sido establecida a partir de las propiedades geotécnicas publicadas por otros autores para los principales litotipos volcánicos identificados en las Islas Canarias (González de Vallejo et al., 2005 y 2008; Rodríguez-Losada et al., 2009; Serrano et al., 2007; Rodríguez-Peces et al., 2013). La estabilidad de la ladera se ha calculado mediante el programa Slide 6.0 (Rocscience Inc., 2010) que emplea diferentes métodos de equilibrio límite. Para este análisis se han empleado dos criterios de rotura: el de Mohr-Coulomb, para los materiales de tipo suelo; y el de Hoek-Brown generalizado (Hoek et al., 2002), para el caso de materiales rocosos. Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad que ha considerado diferentes casos, en función del rango de valores obtenido para las diferentes propiedades geotécnicas (valor medio, máximo y mínimo) y el grado de saturación posible de los materiales (parcial o total).

Los potenciales desprendimientos rocosos se han evaluado mediante el programa Rockfall Analyst (Lan et al., 2007) a través de un sistema de información geográfica (ArcGIS 9.3). Esta aplicación permite obtener las posibles trayectorias 3D de los bloques caídos, considerando el área fuente a diferentes alturas del acantilado. Para determinar el área fuente de los desprendimientos se han identificado los escarpes rocosos con mayor pendiente. Para ello, se ha calculado el índice TPI (*Topographic Position Index*) de Weiss (2001) mediante la herramienta desarrollada por Jenness (2006) para el sistema de información geográfica. El índice TPI permite realizar una clasificación semiautomática de las morfologías del terreno (lomas, cerros, sierras, crestas, pendientes suaves, valles) a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE). Las trayectorias de los bloques se han definido tomando como base un MDE con un tamaño de píxel de 1 x 1 m. Este MDE se generó a partir del mapa topográfico a escala 1:5.000 de GRAFCAN. El análisis de las trayectorias ha permitido evaluar la susceptibilidad frente a los desprendimientos y definir los puntos de la autovía en los que

podrían impactar los bloques. Para este análisis se han combinado varios factores: frecuencia, altura, velocidad y energía de los bloques caídos (Lan et al., 2007).

3. EL ACANTILADO DE EL RINCÓN

El acantilado de El Rincón presenta un desnivel de unos 180 m desde la cota de la GC-2 hasta la coronación de la ladera. Este acantilado permite observar con detalle la estratigrafía de este sector (Fig. 1). En la parte inferior de la ladera aparecen materiales pertenecientes al Grupo Fataga, relacionado con la primera etapa volcánica subaérea de Gran Canaria durante el Mioceno, entre los 8,6 y 13,3 Ma de antigüedad (McDougall and Schmincke, 1976; Bogaard and Schmincke, 1998; Schmincke and Sumita, 2010). Esta fase volcánica está constituida por lavas, ignimbritas y brechas tefríticas, con una composición traquítica a fonolítica, que suelen aparecer intercaladas entre sí. En la base del acantilado aparecen unas lavas fonolíticas, que constituyen una rasa marina sobre la cual está construida la autovía. Por encima del nivel de lavas se observa una capa de ignimbritas fonolíticas no soldadas, de unos 10 m de espesor. A techo de las ignimbritas se dispone un paquete de tobas e ignimbritas fonolíticas soldadas, de unos 25 m de potencia. Sobre estos materiales, y a media ladera, aflora un depósito sedimentario de abanico aluvial (conglomerados y arenas de cantos fonolíticos) perteneciente al Miembro Inferior de la Formación Detrítica de Las Palmas (Gabaldón et al., 1989; Balcells et al., 1992), que se desarrolló durante un extenso periodo erosivo sin actividad volcánica (8,6-5,6 Ma). Esta formación presenta intercalada una capa de ignimbritas fonolíticas no soldadas con un espesor de unos 5 m. Sobre la Formación Detrítica de Las Palmas se apoya una secuencia de unos 45 m de espesor de coladas lávicas de composición basáltica y estructura escoriácea, que están relacionadas con la actividad volcánica del Grupo Roque Nublo (Pérez Torrado et al., 1995). Estos materiales se atribuyen al Plioceno (5,6-2,9 Ma). En el tercio superior del acantilado se observa una capa de unos 20 m de espesor de lavas basánicas pertenecientes al Grupo Post-Roque Nublo, cuya antigüedad oscila entre 2,9 y 1,5 Ma (McDougall and Schmincke 1976; Balcells et al., 1992; Gillou et al., 2004). Coronando el acantilado se encuentran unos depósitos piroclásticos de caída (lapillis, escorias y bombas) con un espesor de hasta 30 m, que están relacionados con un cono del Grupo Post-Roque Nublo situado en las inmediaciones. Estos depósitos piroclásticos se encuentran alterados en los 20 m más superficiales de la unidad.

Desde un punto de vista estructural, las principales discontinuidades que se pueden observar en este macizo rocoso están relacionadas, por una parte, con los contactos subhorizontales entre los diferentes materiales y, por otra, con la fracturación subvertical que presentan. Con respecto a los contactos entre capas, se ha observado la existencia de un nivel arcilloso en el contacto entre la toba fonolítica y la ignimbrita fonolítica infrayacente (Fariña, 1991). Este nivel presenta un espesor centimétrico, consistencia blanda y unas estrías de movimiento que indican la existencia de un desplazamiento relativo entre las tobas y las ignimbritas. Estas observaciones sugieren que los contactos entre litologías con diferente competencia constituyen potenciales superficies de rotura basal, sobre todo si presentan alteraciones

arcillosas. Con respecto a las discontinuidades subverticales, se observa la existencia de un diaclasado y de una red de fracturación. El diaclasado está asociado a la disyunción columnar de las lavas e ignimbritas soldadas. Las fracturas presentan una orientación subparalela al acantilado y un buzamiento de 80° (Fariña, 1991; Cabrera Fuentes, 2013). Estas discontinuidades parecen afectar a todas las formaciones, situándose a diferentes alturas a lo largo de la ladera. Destacan las grietas que aparecieron en la coronación y a media ladera durante la construcción de la GC-2 (1984-1991). Estas grietas siguen activas en la actualidad.

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTOS

Para realizar este análisis se han tenido en cuenta los posibles bloques inestables en el modelo geológico-geotécnico de la ladera. La combinación de las superficies basales de rotura con las fracturas subverticales observadas ha permitido definir bloques rocosos de gran volumen, potencialmente inestables. Las dimensiones de estos bloques superan el millón de metros cúbicos, por lo que su deslizamiento provocaría el bloqueo inmediato de la GC-2. En la Tabla 1 se muestran los valores medios y mínimos de las propiedades geotécnicas empleadas en el análisis de estabilidad.

En primer lugar se han analizado las posibles inestabilidades generadas por la intersección de una grieta subvertical abierta, situada a media ladera, con los contactos litológicos. Los factores de seguridad (FS) obtenidos para estas superficies de rotura son estables ($FS > 2,00$), si se considera el terreno seco. El análisis de sensibilidad de los parámetros realizado indica que el único factor que contribuye a reducir el FS es la presencia de agua en el terreno. Así, para que el bloque definido por una rotura basal situada a muro de la Formación Detrítica de Las Palmas resulte inestable ($FS < 1,00$), es necesario considerar la saturación completa de la Formación Detrítica de Las Palmas y la saturación parcial (41 %) de la capa de toba fonolítica intercalada dentro de esta formación. Para estas condiciones, la probabilidad de rotura es del 55 % (Fig. 2a). Por otra parte, para que se produzca la inestabilidad de mayor volumen, definido por la grieta subvertical y el contacto entre las lavas y las tobas fonolíticas no soldadas (Fig. 2b), es necesaria la saturación completa de las lavas fonolíticas, de las tobas no soldadas y de las ignimbritas soldadas. Para estas condiciones, la probabilidad de rotura es del 53 %. En segundo lugar, se han analizado las posibles inestabilidades generadas por la intersección de una grieta subvertical abierta, localizada en la coronación de la ladera, con los diferentes contactos litológicos. Los factores de seguridad obtenidos para estas superficies de rotura son estables ($FS > 2,00$), si se considera el terreno seco. El bloque que presenta el valor más bajo ($FS = 2,28 \pm 0,59$) corresponde a una rotura superficial a través de los materiales piroclásticos del Grupo Post-Roque Nublo (Fig. 3a). El estudio de sensibilidad de los parámetros indica que la probabilidad de rotura a favor de esta superficie es significativa (52 %) con una reducción de la resistencia a la compresión simple de los piroclastos hasta alcanzar unos valores inferiores a 185 kPa. Sin embargo, la probabilidad de que los piroclastos presenten estos valores tan bajos de resistencia es muy limitada (3 %). En este sentido, es más factible que la rotura se produzca por la presencia de agua en el terreno, como

en el caso anterior. Así, el bloque es inestable, con una probabilidad de rotura de 52 %, cuando la saturación de los piroclastos es de un 65 %. En este caso, el bloque de mayor volumen, definido por la grieta subvertical de cabecera y el contacto entre las lavas y tobas fonolíticas no soldadas (Fig. 3b), resulta inestable (probabilidad de rotura de 52 %) si las lavas fonolíticas, las tobas no soldadas, las ignimbritas soldadas y la Formación Detrítica de Las Palmas se encuentran saturadas de agua al 100 %.

El análisis realizado muestra que los casos con mayor probabilidad de rotura corresponden a los bloques de menor volumen: el primero, definido por la intersección de la grieta subvertical, situada a media ladera, con la base de la Formación Detrítica de Las Palmas (Fig. 2a); el segundo, definido por la intersección de la grieta subvertical, situada en la zona de coronación, con un plano de rotura superficial que afectaría a los piroclastos de caída del Grupo Post-Roque Nublo (Fig. 3a). De los dos casos expuestos, parece más verosímil que se produzca primero el deslizamiento del bloque situado en la zona de coronación, puesto que resulta más factible que los piroclastos alcancen la saturación parcial a que la Formación Detrítica de Las Palmas alcance la saturación completa. Además, el deslizamiento del bloque situado en la zona de coronación se encuentra favorecido por la progresiva apertura que presenta la grieta subvertical (Cabrera Fuentes, 2013) y por la paulatina pérdida de resistencia que experimentan los piroclastos como consecuencia de este movimiento lento.

5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FRENTE A DESPRENDIMIENTOS

La intersección de los planos de discontinuidad descritos en el apartado anterior también permite la formación de bloques de roca de menor tamaño, del orden de unos pocos metros cúbicos a cientos de metros cúbicos. Estos bloques se acumulan al pie de la ladera en forma de coluviones si caen de alturas pequeñas. En este caso no alcanzan la autovía. Las observaciones de campo corroboran que este es el tipo de inestabilidad más frecuente en el acantilado. Sin embargo, es posible que un bloque alcance la autovía en el caso de un desprendimiento que partiese de media ladera o de la zona de coronación. Para analizar estos casos se han delimitado las potenciales áreas fuente de los desprendimientos (Fig. 4). Estas áreas coinciden con zonas de pendientes elevadas ($> 42^\circ$) y se relacionan con diferentes litologías. En la coronación están relacionadas con las lavas del Grupo Post-Roque Nublo; a media ladera, con las lavas del Grupo Roque Nublo; y cerca del pie del acantilado se producen a partir de la ignimbrita no soldada del Grupo Fataga. El tamaño de los bloques observados es relativamente pequeño ($0,125-0,25 \text{ m}^3$), aunque también se han descrito desprendimientos más grandes ($5-50 \text{ m}^3$), relacionados con la ignimbrita fonolítica no soldada. Considerando estos volúmenes y las potenciales áreas fuente, se ha obtenido un mapa de susceptibilidad frente a los desprendimientos (Fig. 5). Este mapa corrobora la observación de que la mayoría de los desprendimientos terminan formando parte de los conos de deyección presentes en la base del acantilado, independientemente de la cota desde la que caiga el bloque. Además, se observa que los bloques con las trayectorias más distantes son frenados por el terraplén de la autovía, lo que impediría que alcanzaran la calzada.

Material	Propiedad	Media	Min	Max
Lavas fonolíticas	γ (kN/m ³)	24	19	29
	RCS (MPa)	109	47	171
	GSI	65	55	75
	m_i	25	20	30
Ignimbritas fonolíticas soldadas	γ (kN/m ³)	21	13	29
	RCS (MPa)	48	18	78
	GSI	65	55	75
	m_i	19	16	22
Tobas e ignimbritas fonolíticas no soldadas	γ (kN/m ³)	13	8	18
	RCS (MPa)	16	3	29
	GSI	30	20	40
	m_i	13	8	18
Formación Detrítica de Las Palmas	γ (kN/m ³)	22	18	26
	c (kPa)	91	84	98
	ϕ (°)	36	35	37
Lavas basálticas escoriáceas (Grupo Roque Nublo)	γ (kN/m ³)	21	13	26
	RCS (MPa)	42	1	84
	GSI	30	30	30
	m_i	25	20	30
Lavas basaníticas (Grupo Post-Roque Nublo)	γ (kN/m ³)	26	22	30
	RCS (MPa)	103	45	161
	GSI	50	30	70
	m_i	25	20	30
Piroclastos de caída (Grupo Post-Roque Nublo)	γ (kN/m ³)	13	7	18
	RCS (MPa)	2,4	0	11,4
	GSI	25	20	30
	m_i	13	8	18
Piroclastos alterados	γ (kN/m ³)	13	11	15
	RCS (MPa)	2	1,9	2,3
	GSI	10	5	15
	m_i	13	8	18
Espaldón de tierras	γ (kN/m ³)	19	19	19
	c (kPa)	80	80	80
	ϕ (°)	35	35	35

Tabla 1. Propiedades geotécnicas empleados en los cálculos de estabilidad para cada uno de los materiales (González de Vallejo et al., 2005 y 2008; Rodríguez-Losada et al., 2009; Serrano et al., 2007; Rodríguez-Peces et al., 2013). γ : peso específico, RCS: resistencia a compresión simple, GSI: *Geological Strength Index* (Marinos et al., 2005), m_i : constante para roca sana (Hoek et al., 2002), c: cohesión, ϕ : ángulo de rozamiento interno, Min: valores mínimos, Max: valores máximos.

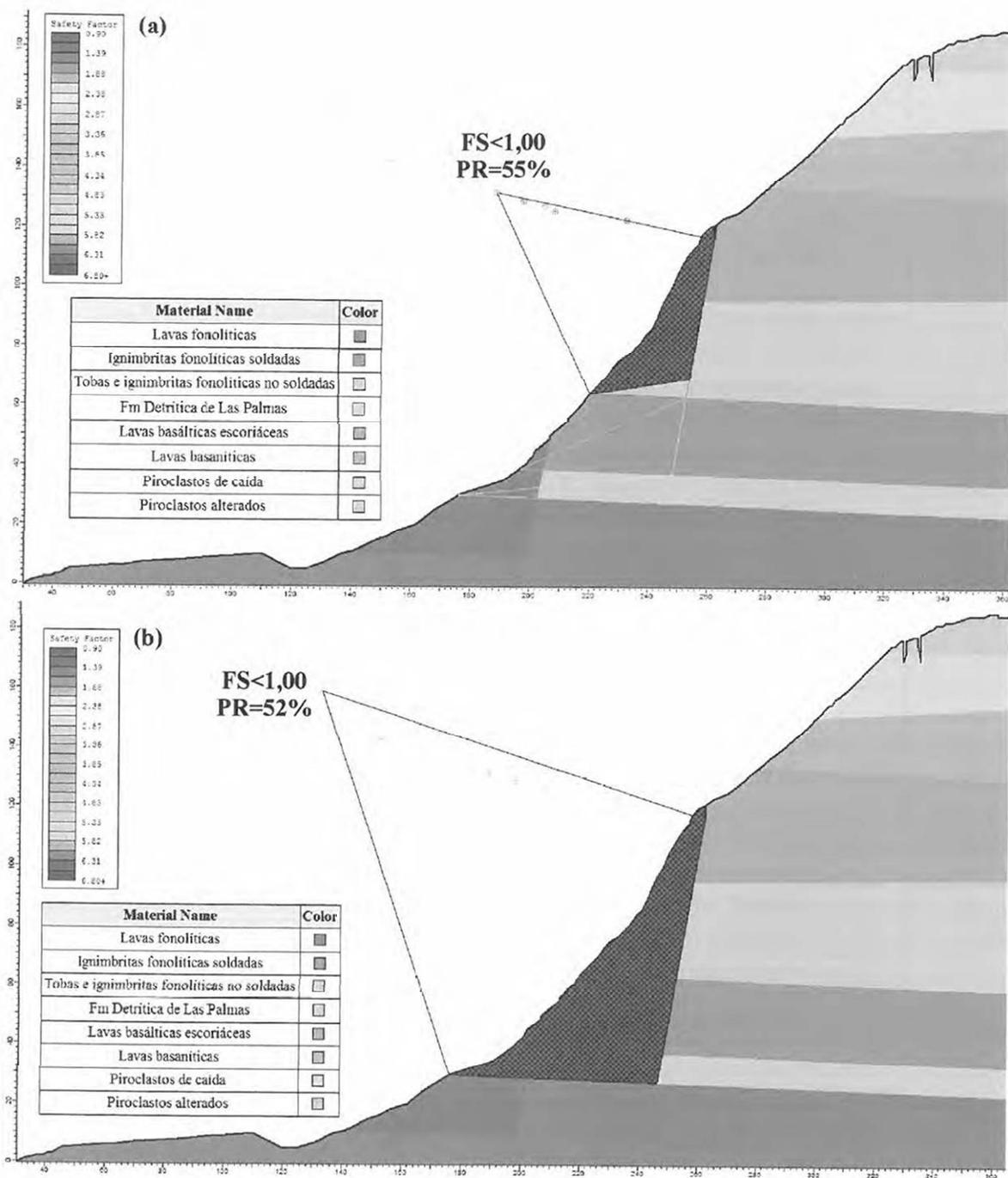


Figura 2. Análisis de estabilidad frente al deslizamiento del acantilado de El Rincón, considerando las superficies de rotura generadas por la grieta subvertical situada a media ladera y los contactos litológicos. (a) Bloque inestable de menor tamaño. (b) Bloque inestable de mayor tamaño. FS: Factor de seguridad. PR: Probabilidad de rotura.

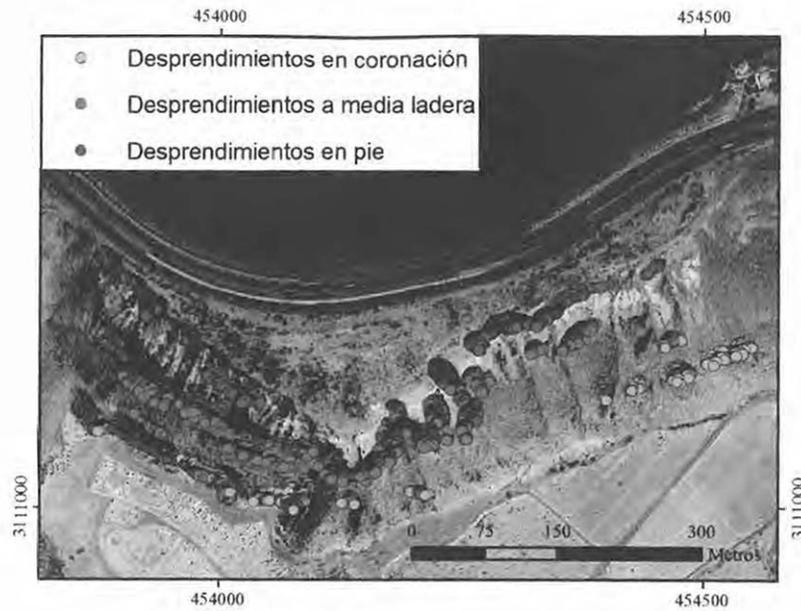


Figura 4. Potenciales áreas fuente de los desprendimientos rocosos derivadas de la clasificación del terreno realizada a partir del modelo digital de elevaciones.

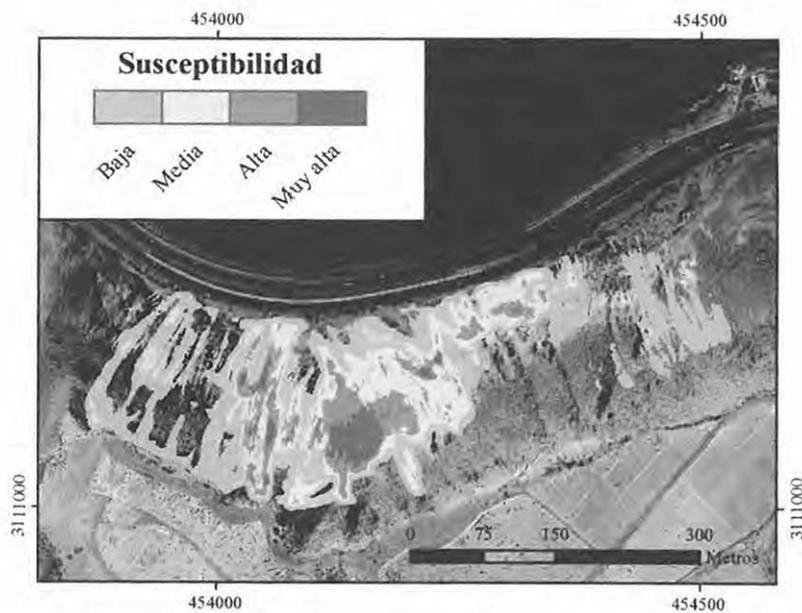


Figura 5. Mapa de susceptibilidad frente a los desprendimientos obtenido mediante el programa Rockfall Analyst (Lan et al., 2007).

6. CONCLUSIONES

El acantilado de El Rincón se puede considerar estable frente a la ocurrencia de

deslizamientos considerando las condiciones secas de la ladera. Esto es congruente con el hecho de que la ladera no presenta surgencias de agua en la actualidad y que el nivel freático se encuentra bastante deprimido; por debajo de los bloques potencialmente inestables.

Por otra parte, se ha observado que sería posible el deslizamiento de dos bloques de gran tamaño si la ladera se llegase a saturar de agua. Estas condiciones requieren un clima más húmedo que el actual, en el que se registrasen periodos con abundantes precipitaciones. Los bloques inestables estarían situados a media ladera y en la zona de coronación. El deslizamiento del bloque situado a media ladera estaría favorecido por la rotura a través de la Formación Detrítica de Las Palmas. El deslizamiento del bloque situado en la coronación tendría un carácter más superficial y estaría favorecido por la rotura de los piroclastos del Grupo Post-Roque Nublo. En un primer análisis, parece más probable el deslizamiento del bloque situado en la coronación puesto que es más factible alcanzar la saturación de los piroclastos que de la Formación Detrítica de las Palmas. Por otra parte, la individuación del bloque superior se encuentra favorecida por el progresivo agrietamiento que experimenta la zona de coronación.

Por último, se puede afirmar que la mayoría de los desprendimientos rocosos que pueden ocurrir en el acantilado de El Rincón no alcanzarán la calzada de la autovía GC-2 y tenderán a acumularse en los conos de deyección presentes al pie de la ladera. No obstante, habría que controlar la velocidad de progradación de estos depósitos, ya que si se aproximan demasiado a la autovía pueden contribuir a que los bloques puedan alcanzar la autovía.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los grupos de investigación GEOGAR (Geología Aplicada y Regional) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y TECTACT (Tectónica Activa, Paleosismicidad y Riesgos asociados, GR35/10-A-910368) de la Universidad Complutense de Madrid.

REFERENCIAS

- Balcells, R. and Barrera, J.L., 1987. *Memoria y mapa geológico de España a escala 1:25.000, Hoja 1101-I (Las Palmas de Gran Canaria)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Balcells, R., Barrera, J.L. and Gómez, J.A., 1992. *Memoria y mapa geológico de España a escala 1:100.000, Hoja 21-21/21-22 (Gran Canaria)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 323 pp.
- Bogaard, P. and Schmincke, H-U., 1998. Chronostratigraphy of Gran Canaria. In: Weaver, P.P.E., Schmincke, H-U., Firth, J.V., Duffield, W. (Editores). *Proceedings of the ODP (Ocean drilling program), Sci results, College Station, TX, Volume 157*, pp. 127-140.
- Cabrera Fuentes, C., 2013. *Análisis cartográfico de los riesgos asociados a los desprendimientos de la ladera del Rincón*. Proyecto Fin de Carrera. Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 67 pp.

- Fariña, P., 1991. *Informe para ACNOR UTE. Acceso a Las Palmas de Gran Canaria por el norte. Tramo Alcaravaneras-El Rincón-Enlace de Arucas (C-810). Estudio de estabilidad del acantilado (pk 3+500 a 4+000)*. Dames & Moore Iberia S.A. Las Palmas de Gran Canaria, 46 pp.
- Gabaldón, V.; Cabrera, M.C. and Cueto, L.A., 1989. Formación Detrítica de Las Palmas. Sus facies y evolución sedimentológica. *European Science Foundation Meeting on Canarian Volcanism*, Arrecife, pp. 210-215.
- Guillou, H., Pérez Torrado, F.J., Hansen Machín, A.R., Carracedo, J.C. and Gimeno, D., 2004. The Plio-Quaternary evolution of Gran Canaria based on new K-Ar ages and magnetostratigraphy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135: 221-246.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. Madrid, 744 pp.
- González de Vallejo, L.I., Hijazo, T., Ferrer, M., 2008. Engineering Geological Properties of the Volcanic Rocks and Soils of the Canary Islands. *Soils and Rocks*, 31(1): 3-13.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. In: Hammah, R., Bawden, W., Curran, J. and Telesnicki, M. (Editores). *Proceedings of NARMSTAC 2002*. Toronto, pp. 267-273.
- Jenness, J., 2006. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v.1.3a. Jenness Enterprises. [Accesible en <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.]
- Lan, C.H., Derek Martin, C. and Lim, C.H., 2007. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33(2): 262-279.
- Marinos, V., Marinos, P. and Hoek, E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 64(1): 55-65.
- McDougall, I. and Schmincke, H.U., 1976. Geochronology of Gran Canaria (Canary Islands): age of shield building volcanism and other magmatic phases. *Bulletin of Volcanology*, 40(1): 57-77.
- Pérez-Torrado, F.J., Carracedo, J.C. and Mangas, J., 1995. Geochronology and stratigraphy of the Roque Nublo Cycle, Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of the Geological Society*, 152: 807-818.
- Rocscience Inc., 2010. *Slide 6.0 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis*. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canadá.
- Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A. and Eff-Darwich, A., 2009. Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182: 67-75.
- Rodríguez-Peces, M.J., Yepes Temiño, J., Martín-Nicolau, E., 2013. Geotechnical features of the volcanic rocks related to the Arteara rock avalanche in Gran Canaria (Canary Islands, Spain). In: Margottini, C.; Canuti, P.; Sassa, K. (Editores). *Landslide Science and Practice. Volume 3: Spatial Analysis and Modelling*. Roma, en prensa.
- Serrano, A., Olalla, C., Perucho, A., Hernández-Gutiérrez, L.E., 2007. Strength and deformability of low density pyroclasts. In: Nunes J.C. and Malheiro, M.M. (Editores). *Volcanic Rocks*. Taylor & Francis Group. London, pp. 35-43.
- Schmincke, H.U. and Sumita, M., 2010. *Geological evolution of the Canary Islands. A Young Volcanic Archipelago Adjacent to the Old African Continent*. Görres Verlag. Koblenz, 188 pp.
- Weiss, A., 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.