

Guías geotécnicas aplicables a proyectos y obras en terrenos volcánicos: Getcan y Macastab

Geotechnical Guides to Be Applicable to Projects and Works in Volcanic Environments: Getcan and Macastab

Luis Enrique Hernández Gutiérrez^{*}

Resumen

Los gobiernos regionales de Canarias, Azores y Madeira deben desarrollar documentos normativos que recojan la singularidad de sus terrenos volcánicos y que faciliten la aplicación de las normas que dictan sus respectivos países en materia constructiva. Por este motivo, surge la guía GETCAN-011, como metodología para la realización de estudios geotécnicos para edificación en Canarias, pero que se puede aplicar a cualquier territorio volcánico del planeta. A raíz de la convocatoria de proyectos del Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020, los gobiernos regionales de Canarias, Azores y Madeira, junto a la Universidad de Cabo Verde, se han unido para trabajar en el proyecto MACASTAB, que pretende facilitar la gestión de un problema geotécnico común, los movimientos de laderas y taludes. En este artículo se presentan las aportaciones de ambos proyectos al ámbito de la Geotecnia en terrenos volcánicos.

Palabras clave: terrenos volcánicos, estabilidad de taludes, estudios geotécnicos.

Abstract

The regional governments of the Canary Islands, the Azores and Madeira must develop normative documents that reflect the uniqueness of their volcanic soils, and that facilitate the application of the rules dictated by their respective countries in constructive matters. For this reason, the GETCAN-011 guide was created as a methodology for geotechnical studies for building on the Canary Islands, but it can also be applied to any volcanic territory. Following the call for projects of the INTERREG V-A Spain-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020 Cooperation Program, the regional governments of the Canary Islands, the Azores and Madeira, together with the University of Cape Verde, have joined forces to work on the MACASTAB project, which aims to facilitate the management of a common geotechnical problem, that's, the movements of hillsides and slopes. This article presents the contributions of both projects to the field of Geotechnics in volcanic terrains.

Keywords: volcanic terrains, slope stability, geotechnical studies.

1. INTRODUCCIÓN

España y Portugal tienen en común que la mayoría de su territorio se ubica en territorio continental, en la Península Ibérica, pero además que ambos países poseen territorios insulares atlánticos, que se corresponden con archipiélagos de naturaleza volcánica (Canarias, Azores y Madeira). Con frecuencia, las normas y códigos, que en materia de construcción se dictan en los respectivos países, no recogen las singularidades de estos archipiélagos volcánicos, lo que dificulta la aplicación de las mismas por parte de los técnicos que desarrollan allí su actividad. Esto obliga a los gobiernos regionales a realizar un esfuerzo adicional para desarrollar documentos propios que recojan las peculiaridades de su territorio volcánico, que permitan interpretar, adaptar y aplicar la normativa estatal con garantía y rigor.

En España, la irrupción del Código Técnico de la Edificación (CTE) en el panorama normativo del país ha supuesto un hito en la regulación de los estudios geotécnicos para edificación, ya que, por primera vez, se define la intensidad y alcance de los reconocimientos, así como la obligatoriedad de acompañar estos estudios al proyecto de edificación. Esto supuso un reto y una oportunidad para el Gobierno de Canarias, pues se hacía necesaria la interpretación de la norma estatal con un documento que recogiera las peculiaridades geotécnicas de los terrenos volcánicos de Canarias; y que más tarde serviría de base para otros documentos normativos, así como para otros estudios e investigaciones en la materia. Así surge la guía GETCAN-011, que, además, en 2013 fue aprobada por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España como Documento Reconocido del CTE, con referencia CTE-DR/045/13.

GETCAN requirió de trabajos previos de investigación de las propiedades geotécnicas de los materiales volcánicos, porque los estudios realizados eran escasos y dispersos, y estaban circunscritos únicamente a casos puntuales relacionados con algunas obras. Así, en 2002, se iniciaron varios proyectos de caracterización de los materiales

^{*} E-mail: lhergut@gobiernodecanarias.org

¹ Doctor en Ciencias Geológicas. Gobierno de Canarias, Santa Cruz de Tenerife, España. Proyecto MACASTAB, Feder Interreg-Mac 2014-2020.

volcánicos de Canarias que sirvieron de base para la redacción de la guía y cuyos resultados actualmente siguen utilizándose por la comunidad científica y técnica, y en particular en el proyecto MACASTAB.

Por otro lado, la elevada incidencia, en las últimas décadas, de eventos meteorológicos causantes de procesos de inestabilidad de laderas y taludes en los archipiélagos volcánicos de la Macaronesia, como consecuencia del cambio climático, la creciente urbanización y su desarrollo en áreas expuestas a estos fenómenos, demandaba por parte de técnicos y responsables públicos, un documento normativo y/o guía que estableciera los procedimientos de actuación adecuados ante la ocurrencia de estos procesos, que garantice por un lado la efectividad de las soluciones técnicas aportadas por los profesionales y por otro que delimite la responsabilidad civil de los distintos agentes intervinientes en los mismos (técnicos y responsables públicos). Así, en 2016, surge el proyecto MACASTAB, cuyo objetivo principal es obtener un documento de bases para que las regiones implicadas puedan elaborar sus guías metodológicas para la gestión de este tipo de riesgos naturales. El ámbito de actuación abarca a los archipiélagos de Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde.

En este artículo se presentan ambos proyectos, GETCAN y MACASTAB y se exponen algunas de las aportaciones más importantes que de ellos se han derivado para la Geotecnia en terrenos volcánicos.

2. GUÍA DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS PARA LA EDIFICACIÓN EN CANARIAS, GETCAN-011

2.1. Antecedentes de la guía GETCAN-011

La publicación de la *Guía para la Planificación y Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias, GETCAN-011* (Gobierno de Canarias, 2011), formó parte de un plan de proyectos que comenzó a gestarse por parte de la Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias en el año 2002. Este plan consistió, en sus primeras etapas, en la caracterización geotécnica de los materiales volcánicos presentes en Canarias y posteriormente, la información obtenida se empleó para la elaboración de la cartografía geotécnica y la guía de estudios geotécnicos para edificación.

El primero de los proyectos denominado “Estudio de caracterización geotécnica de las rocas volcánicas de las islas Canarias”, consistió en la elaboración de una base de datos con las propiedades geomecánicas y geoquímicas de todas las formaciones rocosas del Archipiélago, así como de las correlaciones entre los parámetros más empleados en la práctica geotécnica.

El segundo de los proyectos, denominado “Caracterización geotécnica de los piroclastos canarios débilmente cementados”, fue realizado en colaboración con el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

En el proceso de desarrollo de estos proyectos irrumpe en el panorama normativo español un documento de gran importancia en el sector de la construcción: el Código Técnico de la Edificación, CTE (Gobierno de España, 2006).

Este código, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, se estructura en varios documentos que regulan los distintos aspectos que intervienen en el proceso edificatorio, entre los que interesa destacar el Documento Básico de Seguridad Estructural, Cimientos, DB SE-C (CTE, 2006), que dedica su capítulo 3 al Estudio Geotécnico. Este documento de planificación emplea como criterio básico para tal fin los tipos de terrenos, clasificándolos en tres grupos o categorías: T-1 Terrenos favorables, T-2 Terrenos intermedios y T-3 Terrenos desfavorables. La aplicación de este documento a los terrenos volcánicos de Canarias requería de una herramienta que permitiera su interpretación, surgiendo la necesidad de elaborar la correspondiente guía.

La guía GETCAN-011 es un documento, dirigido a los distintos agentes que intervienen en el proceso edificatorio, donde se articula una metodología adecuada para la planificación de los reconocimientos geotécnicos preceptivos en los proyectos de edificación (CTE, 2006), así como para la realización de los estudios geotécnicos correspondientes, de acuerdo con la normativa vigente y teniendo en cuenta las peculiaridades de los terrenos volcánicos de las Canarias.

Los estudios geotécnicos deberán contar, de acuerdo a esta guía, con un contenido suficiente que satisfaga los requerimientos del proyectista y del director de la obra para poder proceder al análisis y dimensionado de los cimientos y elementos de contención del edificio.

Con objeto de facilitar su manejo, la estructura y contenido de la guía GETCAN-011 se organiza en diferentes partes, atendiendo al interés que cada una de ellas pueda despertar en los usuarios del documento; como aportación importante a la geotecnia en terrenos volcánicos, se destacan las siguientes que se exponen a continuación.

2.2. Mapas de zonificación geotécnica de las Canarias

Para la elaboración de los mapas de zonificación geotécnica del Archipiélago se ha empleado como base la cartografía geológica digital del IGME, Instituto Geológico y Minero de España, a escala 1:25.000, suministrada por GRAFCAN, Cartográfica de Canarias, S.A. (Barrera & García, 2011). En este sentido, tomando como base las trazas cartográficas de las distintas unidades geológicas de la cartografía del IGME, se establecieron un conjunto de unidades geotécnicas integrando dentro de las mismas una o varias unidades geológicas.

La metodología empleada consistió en realizar una parcelación del territorio insular en áreas de características litológico-geotécnicas similares, que permitiera establecer, en cada unidad/unidades geotécnicas, los criterios mínimos a contemplar en el reconocimiento o investigación geotécnica. De esta forma, y en función de las características de la construcción y de los problemas geotécnicos asociados a cada unidad geotécnica diferenciada, se propondrían los reconocimientos mínimos exigibles en cada caso.

Como resultado de esta zonificación se confeccionó una clasificación de unidades geotécnicas del archipiélago canario (tabla 1). Cada una de estas unidades se asignó a su vez a uno de los tres tipos de terrenos que define el CTE para la planificación de la campaña de reconocimientos geotécnicos.

Tabla 1. Clasificación de unidades geotécnicas de las Canarias y tipo de terreno del CTE

Unidad	Subunidad	Terreno CTE
Unidad I: Complejos basales		T3
Unidad II: Coladas y macizos sálicos		T1
Unidad III: Macizos basálticos alterados		T3
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Coladas "aa" poco escoriáceas	T1
	IVb: Coladas "pahoehoe" y "aa" muy escoriáceas	T3
Unidad V: Materiales piroclásticos	Va: Ignimbritas y tobas	T2
	Vb: Depósitos piroclásticos sueltos o débilmente cementados	T3
Unidad VI: Materiales brechoides		T2
Unidad VII: Depósitos aluviales y coluviales		T3
Unidad VIII: Suelos arenosos		T3
Unidad IX: Suelos arcillosos y/o limosos		T3
Unidad X: Rellenos antrópicos		T3

Tabla 2. Profundidad mínima de sondeos (m)

Unidad Geotécnica (Terreno CTE) / Tipo de Edificio	I (T-3)	II (T-1)	III (T-3)	IVa (T-1)	IVb (T-3)	Va (T-2)	Vb (T-3)	VI (T-2)	VII (T-3)	VIII (T-3)	IX (T-3)
C-0	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5
C-1	8	6	8	6	8	7	8	7	8	8	8
C-2	12	8	12	8	12	10	12	10	12	12	12
C-3	16	10	16	10	16	12	16	12	16	16	16
C-4	20	12	20	12	20	14	20	14	20	20	20

2.3. Planificación del reconocimiento geotécnico en terrenos volcánicos

La planificación de la campaña de reconocimiento geotécnico es el conjunto de actividades destinadas a determinar las características del terreno, cuyos resultados quedarán reflejados en el estudio geotécnico. En esta parte se establece la intensidad y alcance del reconocimiento geotécnico de acuerdo con los preceptos recogidos en el capítulo 3 "estudio geotécnico" del DB SE-C del CTE y teniendo en cuenta las singularidades del territorio insular volcánico.

Como criterios de planificación se han de considerar, según el CTE, el tipo de terreno (unidad geotécnica) y el tipo de edificio. El CTE define cinco categorías de edificio atendiendo al número de plantas y a la superficie construida, que de menor a mayor son: C-0, C-1, C-2, C-3 y C-4. A partir del tipo de edificio y de la unidad geotécnica el CTE establece un protocolo que permite concretar el número de prospecciones y ensayos que es preciso realizar para un caso concreto. En cuanto a la profundidad de los sondeos mecánicos y de las penetraciones dinámicas, el CTE indica unas profundidades orientativas, pero no obligatorias, mientras que la guía GETCAN-011 establece unas profundidades mínimas obligatorias para cada unidad geotécnica en función del tipo de edificio proyectado (tabla 2). Será obligación del autor del estudio geotécnico, en base a sus conocimientos y experiencia, prolongar la profundidad final de los reconocimientos hasta que resulte suficiente para alcanzar una cota del terreno por debajo de la cual se pueda garantizar que no se desarrollarán asientos significativos bajo las cargas que pueda transmitir el edificio.

2.4. Otras herramientas geotécnicas de la guía GETCAN

Otras aportaciones de la guía GETCAN-011 útiles y prácticas para los profesionales de la geotecnia, que desarrollen su actividad en ambientes volcánicos, son las siguientes.

2.4.1. Clasificación de litotipos volcánicos aplicados a la Ingeniería Civil y a la Arquitectura

Se aporta una clasificación simplificada del amplio espectro de tipos de rocas o litotipos volcánicos, para su aplicación en el sector de la construcción. El objeto de esta clasificación es facilitar al ingeniero civil y al arquitecto, con conocimientos limitados de geología, un medio para asignar un nombre a una roca, que tal vez no sea estrictamente correcto desde el punto de vista geológico, pero que permite situar a la misma dentro de una familia y, por tanto, ayudar a la identificación de problemas ingenieriles asociados con esa familia. Los nombres se han seleccionado principalmente entre aquellos que se utilizan en los libros no especializados en geología, y no se utilizan en sentido estricto, sino en término general para un amplio grupo de tipos de rocas (litotipos) relacionadas.

En base a criterios sencillos y de fácil aplicación por no expertos en petrología volcánica, como son conceptos litológicos básicos, texturas fácilmente identificables y contenido en vacuolas, se elaboró la clasificación que se presentan en la tabla 3, para los materiales volcánicos altamente cohesivos (rocas duras).

Para los materiales volcánicos granulares sueltos o poco cohesivos, como es el caso de los depósitos piroclásticos, se elaboró una clasificación aparte (tabla 4); en este caso se

Tabla 3. Clasificación de litotipos volcánicos de las Canarias: materiales altamente cohesivos (ROCAS)

BASALTOS (B)	OLIVÍNICO-PIROXÉNICOS (OP)	VACUOLARES (V)	B-OP-V
		MASIVOS (M)	B-OP-M
	PLAGIOCLÁSICOS (PL)	VACUOLARES (V)	B-PL-V
		MASIVOS (M)	B-PL-M
	AFANÍTICOS (AF)	VACUOLARES (V)	B-AF-V
MASIVOS (M)		B-AF-M	
	ESCORIÁCEOS (ES)		B-ES
TRAQUIBASALTOS (TRQB)			TRQB
TRAQUITAS (TRQ)			TRQ
FONOLITAS (FON)			FON
IGNIMBRITAS (IG)	SOLDADAS		IG-S
	NO SOLDADAS		IG-NS

Tabla 4. Clasificación de litotipos volcánicos de las Canarias: materiales sueltos o poco cohesivos (PIROCLASTOS)

PIROCLASTOS BASÁLTICOS	LAPILLI (LP)	SUELTO (S)	LPS
		CEMENTADO (T)	LPT
	ESCORIAS (ES)	SUELTO (S)	ESS
		CEMENTADO (T)	EST
	CENIZAS BASÁLTICAS (CB)	SUELTO (S)	CBS
		CEMENTADO (T)	CBT
PIROCLASTOS SÁLICOS	PÓMEZ (PZ)	SUELTO (S)	PZS
		CEMENTADO (T)	PZT
	CENIZAS SÁLICAS (CS)	SUELTO (S)	CSS
		CEMENTADO (T)	CST

aplicaron, además de los criterios litológicos básicos, el de tamaño de partículas y el de grado de cementación.

A cada uno de los litotipos resultantes de estas clasificaciones, se le asignó un acrónimo de tres o cuatro letras, que hace referencia a los criterios de clasificación (litología, textura, vesicularidad, tamaño de partículas y grado de cementación).

2.4.2. Correlaciones entre los ensayos de caracterización geomecánica de las rocas volcánicas

A partir de los estudios de caracterización de rocas volcánicas de Canarias, realizados por el Gobierno de Canarias, se generó una base de datos de parámetros físico-mecánicos cuya síntesis se presenta como apéndice en la guía, quedando a disposición de los profesionales de la geotecnia. Con este conjunto de parámetros, además, se

estudiaron las correlaciones más significativas entre ellos, de manera que se fuera posible estimar determinados parámetros geomecánicos más costosos y complejos, a partir de otros obtenidos mediante ensayos de bajo coste y fácil ejecución. Estas correlaciones se establecieron para cada uno de los litotipos rocosos definidos. Este es el caso del valor de la resistencia a compresión simple, la resistencia a tracción o el módulo de deformación elástica.

Para estimar en una primera aproximación el valor de la resistencia a compresión simple (σ_c) a partir de la resistencia deducida del esclerómetro ($\sigma_{cSchmidt}$) se obtuvo la expresión:

$$\sigma_c = K_1 * \sigma_{cSchmidt} \tag{1}$$

Donde K_1 vale para el conjunto de litotipos 1.18
Para cada litotipo específico, los valores de K son:

Litotipo	BOPM	BOPV	BPLM	BAFV	BAFM	BES	TRQB	TRQ	FON	IGNS	IGS
K_1	1.40	1.00	1.50	0.50	1.30	0.90	1.00	1.20	1.40	0.55	0.75

También es posible directamente con el índice de rebote (R) obtenido con el esclerómetro, estimar la resistencia a compresión simple ($\sigma_{cSchmidt}$) a partir del peso específico, utilizando la expresión indicada a continuación, modificada a partir de las de (Miller, 1965 y Deere y Miller, 1966) y adaptada a la población de rocas volcánicas de Canarias:

$$\log \sigma_{cSchmidt} = 0.00034\gamma R + 0.0426\gamma - 0.0017R + 0.41 \tag{2}$$

Donde σ_c está expresado en MPa y γ (peso específico aparente) en KN/m^3 .

A partir del ensayo de carga puntual (PLT) se recomienda, para obtener el valor de la resistencia a compresión simple, utilizar la expresión:

$$\sigma_c = K_2 I_s(50) \tag{3}$$

Con un valor para el parámetro k_2 en conjunto de 15.

Litotipo	BOPM	BOPV	BPLM	BPLV	BAFV	BAFM	BES	TRQB	TRQ	FON	IGNS	IGS
K_2	17	9	12	14	5	16	10	12	18	22	9	13

Para obtener en una primera aproximación el valor de la resistencia a tracción indirecta se recomienda utilizar la expresión:

$$\sigma_c = K3 * \sigma_{t, \text{brasileño}} \quad [4]$$

Litotipo	BOPM	BOPV	BPLM	BPLV	BAFV	BAFM	BES	TRQB	TRQ	FON	IGNS	IGS
K_3	2.5	1.9	2.6	1.9	1.1	2	1.6	1.5	2.3	2.9	1.5	1.2

3. PROYECTO MACASTAB: ELABORACIÓN DE GUÍAS DE MOVIMIENTOS DE LADERAS PARA LOS ARCHIPÉLAGOS VOLCÁNICOS DE LA MACARONESIA

3.1. Antecedentes del proyecto MACASTAB

Los movimientos de ladera son fenómenos que constituyen uno de los riesgos naturales más importantes que afectan a los archipiélagos volcánicos de la Macaronesia y que inciden en ellos con una frecuencia mucho más intensa de lo que lo hacen en el territorio continental. Consisten en la movilización pendiente abajo de una masa de suelo, derrubios y/o roca, impulsada por intensas fuerzas gravitacionales. En estos fenómenos intervienen un gran número de factores condicionantes y desencadenantes, tipologías y mecanismos de rotura, propios de los archipiélagos volcánicos, que es preciso concretar, definir y clasificar para poder abordar con éxito esta problemática y adoptar las medidas adecuadas para reducir al máximo los riesgos para la sociedad.

La Comisión Europea aprobó el Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020 que interviene en cinco grandes ámbitos u objetivos temáticos, uno de los cuales, el Eje 3, está dedicado a promover la adaptación al cambio climático y la prevención y gestión de riesgos. El objetivo específico de la prioridad de inversión de este eje es mejorar la capacidad de respuesta ante los posibles riesgos naturales que afectan al espacio de cooperación. Con estas premisas, la Viceconsejería de Infraestructuras y Transportes del Gobierno de Canarias toma la iniciativa de liderar una candidatura de proyecto a este programa, junto a los socios del Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de la Región Autónoma de Madeira, el Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de la Región Autónoma de Azores y la Universidad de Cabo Verde. El proyecto, aprobado en la 1ª convocatoria del programa con el código MAC/3.5b/027, lleva por título: “Bases para la elaboración de una guía metodológica para la gestión del riesgo natural producido por la inestabilidad de laderas y taludes de naturaleza volcánica en la Macaronesia”.

Actualmente en desarrollo, el proyecto MACASTAB ya ha dado como frutos algunas herramientas y aplicaciones geotécnicas de gran interés para profesionales e instituciones

Por litotipos los valores a utilizar son los siguientes:

Con un valor para el parámetro k_3 en conjunto de 2.2. Considerando litotipos de manera individualizada, se puede aplicar los siguientes valores de k_3 :

del ámbito de la ingeniería geológica y los riesgos naturales, que se exponen en los siguientes apartados.

3.2. Objetivos y metodología del proyecto MACASTAB

El objetivo general del proyecto es disponer de un documento técnico de bases que permita elaborar una guía metodológica que facilite la adecuada gestión de los riesgos naturales derivados de los movimientos de laderas y taludes adaptada a las circunstancias propias de las islas volcánicas de la Macaronesia. Con este documento, cada región volcánica insular de la Macaronesia podrá redactar su propia guía de gestión de los riesgos naturales derivados de los movimientos de ladera, adaptado a sus singularidades territoriales, sociales, administrativas y políticas, incorporando aquellos documentos técnicos y/o normativos que consideren más apropiados o que sean preceptivos en sus respectivos territorios.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Objetivo específico 1: Ofrecer un sistema de evaluación de inestabilidades de laderas en función de los factores que provocan su presencia y de los que finalmente desencadenan su colapso.
- Objetivo específico 2: Proponer métodos analíticos de identificación y valoración de inestabilidad de laderas así como criterios de diseño de medidas de protección adecuados a cada caso.
- Objetivo específico 3: Identificar el grado de exposición a los riesgos naturales que se asume en cada situación a partir de la aplicación de metodologías para el análisis de riesgos por movimiento de laderas en función de la probabilidad del suceso, considerando los efectos del cambio climático y de sus consecuencias.

Para la consecución de estos objetivos, se ha configurado un equipo técnico constituido por expertos de los distintos archipiélagos participantes, con experiencia en la gestión de este tipo de riesgos y vinculados a entidades de reconocido prestigio en el ámbito de la ingeniería civil radicadas en los mismos. La metodología empleada consiste en la elaboración de los documentos correspondientes a cada una de las actividades previstas para cada uno de los objetivos planteados. Estas actividades son las siguientes:

Actividades del objetivo específico 1:

- a) Identificar y clasificar los factores condicionantes de la inestabilidad de laderas en los archipiélagos volcánicos de la Macaronesia.
- b) Identificar de los factores desencadenantes de la inestabilidad de laderas en la Macaronesia.
- c) Elaborar una clasificación de laderas volcánicas en función de los factores que intervienen en su inestabilidad.

Actividades del objetivo específico 2:

- d) Propuesta de una clasificación geomecánica para los terrenos volcánicos macaronésicos.
- e) Propuesta y adaptación de métodos analíticos de cálculo para la valoración de inestabilidad de laderas.
- f) Propuesta de medidas preventivas de control y protección de laderas.

Actividades del objetivo específico 3:

- g) Elaboración de unas bases metodológicas para el análisis de riesgos por deslizamientos y desprendimientos en terrenos volcánicos.
- h) Estudiar la relación entre el cambio climático y la incidencia en la ocurrencia de movimientos de ladera en la región de la Macaronesia.
- i) Realizar varias experiencias piloto en la que se aplique el procedimiento y las herramientas propuestas a casos de inestabilidades reales.

3.3. Aplicaciones geotécnicas aportadas por el proyecto MACASTAB

Como aplicaciones geotécnicas destacables, fruto de ejecución de las actividades del proyecto, que se han desarrollado hasta la fecha, se destacan las siguientes.

3.3.1. Actuaciones iniciales ante inestabilidades de laderas y taludes: Índice ISTV.

La primera actuación debe consistir en realizar un reconocimiento del lugar y emitir un diagnóstico previo en el que se valore de forma preliminar las condiciones en las que se ha producido la incidencia que han dado lugar a la inestabilidad. Para ello se ha propuesto un procedimiento de valoración de la situación de inestabilidad por un técnico no experto que, a partir de una serie de criterios de fácil aplicación en el campo es capaz de decidir sobre la necesidad de la intervención o no de expertos que realicen un estudio exhaustivo. Es frecuente que la primera valoración de la incidencia la realice personal técnico no especializado o no experto en estabilidad de taludes y laderas, motivo por lo que se ha implementado esta aplicación, el índice ISTV, cuyo acrónimo significa índice de Susceptibilidad de Taludes en Macizos Volcánicos.

El ISTV es un procedimiento de evaluación preliminar del grado de inestabilidad de un talud. Si el grado de inestabilidad es superior a 2 (tabla 5), se recomienda hacer un estudio más detallado. Para la aplicación del ISTV se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El grado de susceptibilidad indica la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de inestabilidad en el talud: a mayor grado, mayor probabilidad de inestabilidades.
- No es aplicable a taludes con pendiente <25°, ni a taludes formados por suelos o rocas muy meteorizadas.
- La máxima puntuación del ISTV es 100.
- El ISTV es aplicable a los macizos A (rocas duras), B (Materiales piroclásticos de caída) o C (secuencia de materiales de distinta competencia). En otro tipo de macizos no es aplicable. De las opciones A, B o C solo podrá elegirse una de ellas.

Para los macizos de tipo A, se evalúa visualmente el grado de fracturación y el buzamiento de la estructura geológica; para los macizos de tipo B se evalúa el grado de compactación o soldamiento de las partículas entre sí; y para los macizos de tipo C se evalúa el grado de erosión diferencial y la presencia de cornisas. Además, para los tres tipos de macizos se valora la pendiente del talud, la cercanía a zonas costeras y la presencia de indicadores de inestabilidad en el terreno y en infraestructuras (grietas, deformaciones, desprendimientos, etc.). A cada uno de estos criterios se le asigna una puntuación cuya suma final nos permitirá encuadrar la incidencia en uno de los 4 grados definidos en la tabla 5.

Tabla 5. Puntuación y valoración del índice ISTV

Grado	Puntuación ISTV	Susceptibilidad
1	≤ 30	Baja
2	> 30 ≤ 55	Moderada
3	> 55 ≤ 80	Alta
4	> 80	Muy Alta

3.3.2. Clasificación de unidades geotécnicas de los archipiélagos volcánicos de la Macaronesia

Se han clasificado todos los materiales geológicos que se pueden encontrar en los archipiélagos volcánicos de la Macaronesia, en unidades geotécnicas a las que se le puede atribuir un comportamiento geomecánico y geotécnico similar, con el fin de simplificar la gran variedad de materiales presentes en las islas. Tomando como base la clasificación de unidades geotécnicas de Canarias (GETCAN-011), el grupo de expertos ha elaborado la clasificación de Unidades Geotécnicas de la Macaronesia que se presenta en la figura 1.

3.3.3. Tipos de inestabilidades de ladera que afectan a las unidades geotécnicas de la Macaronesia

A modo orientativo, se ha establecido que tipologías de inestabilidades son las características o habituales de cada unidad geotécnica, para determinar el tipo de movimiento de ladera que podría afectar al talud o ladera en cuestión. Empleando las tablas 6A y 6B, podemos realizar la “Estimación previa del tipo de inestabilidad” que se indica en el diagrama de flujo de la figura 1 y así poder dirimir entre las dos opciones:

- “Caída de rocas, ir a diagrama de flujo 3”.
- “Otro tipo: ir a diagrama de flujo 4”.

Unidad Geotécnica	Subunidad
Unidad I: Complejos basales	
Unidad II: Coladas y macizos sálicos masivos	
Unidad III: Coladas basálticas alteradas	
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Muy escoriáceas y/o pahoe-hoe
	IVb: Masivas o poco escoariáceas
Unidad V: Materiales piroclásticos	Va: Ignimbrita soldada
	Vb: Tobas surtseyanas
	Vc: Aglomerados de naturaleza pumítica
	Vd: Aglomerados de naturaleza basáltica
	Ve: Aglomerados brechoides
	Vf: Depósitos piroclásticos pumíticos sueltos
	Vg: Depósitos piroclásticos basálticos sueltos
	Vh: Ignimbritas no soldadas
Unidad VI: Depósitos aluvio-coluviars	
Unidad VII: Arenas litorales	
Unidad VIII: Suelos arcillosos y limosos	
Unidad IX: Suelos superficiales / vegetales	
Unidad X: Caliches	
Unidad XI: Rellenos antrópicos	

Figura 1. Clasificación de unidades geotécnicas de la Macaronesia.

Tabla 6A. Tipos de inestabilidades habituales en las unidades geotécnicas de la Macaronesia

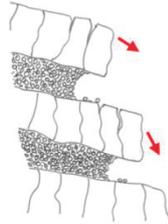
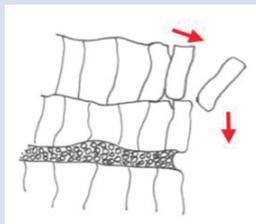
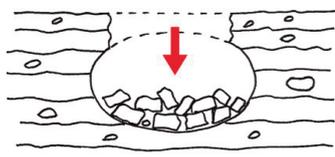
Tipo de inestabilidad	Descripción del movimiento	Unidad geotécnica	Observaciones
	 <p>Caída de bloques y "chinos"</p>	I Vb Vc Vd Ve Vf Vg VI	<ul style="list-style-type: none"> Desprendimientos de bloques de tamaño decimétrico a métrico por erosión de la matriz. Caída de partículas de tamaño centimétrico a milimétrico (Chineo).
Desprendimientos	 <p>Caídas por descalces</p>	IVa IVb V Vh X	<ul style="list-style-type: none"> Erosión de los niveles piroclásticos o de niveles escoriáceos de coladas basálticas "aa", que provocan caída por descalce de prismas rocosos.
	 <p>Vuelcos</p>	II III IVa IVb	<ul style="list-style-type: none"> Vuelco de prismas rocosos aislados por diaclasado de retracción.
	 <p>Colapsos</p>	IVa	<ul style="list-style-type: none"> Colapso de tubos o cavidades formadas en el seno de lavas "pahoehoe".

Tabla 6B. Tipos de inestabilidades habituales en las unidades geotécnicas de la Macaronesia

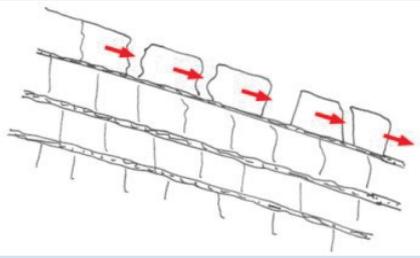
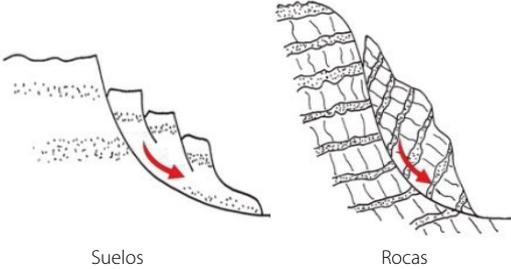
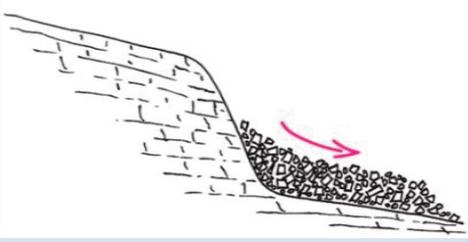
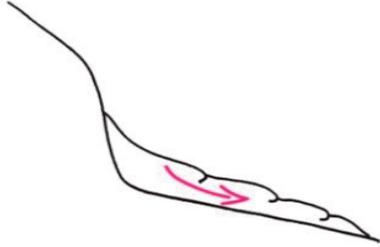
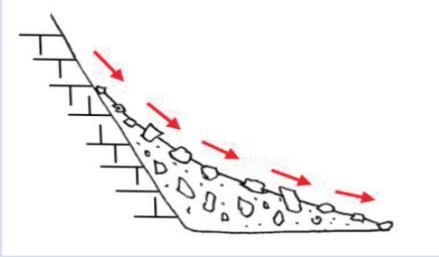
Tipo de inestabilidad	Descripción del movimiento	Unidad geotécnica	Observaciones
Deslizamientos traslacionales en rocas o suelos		I II III IV V VI VII VIII IX X	<ul style="list-style-type: none"> Puede afectar a cualquier unidad geotécnica, que se moviliza a favor de una superficie plana de debilidad o de una discontinuidad.
Deslizamientos rotacionales	 Suelos Rocas	I II III IV V VI VIII IX	<ul style="list-style-type: none"> Son más frecuentes en suelos cohesivos. También en macizos rocosos blandos o con alto grado de fracturación o alteración, donde las discontinuidades no constituyen superficies de debilidad preferentes.
Avalanchas rocosas		II III IVa IVb Va Ve Vh	<ul style="list-style-type: none"> Movimiento de grandes masas de roca, que forman depósitos caóticos y masivos, con megabloques de estructuras volcánicas originales y facies de matriz.
Flujos de barro		VIII IX	<ul style="list-style-type: none"> Se dan en materiales predominantemente finos y homogéneos, ocasionados por la pérdida de resistencia del material por su saturación en agua.
Flujo de tierra y derrubios		VI VII XI	<ul style="list-style-type: none"> Depósitos de granulometría diversa (finos y gruesos) que se movilizan por acción del agua.

Tabla 7. Grados de estabilidad de taludes (Muñiz & González-Gallego, 2018)

Puntuación obtenida	Grado de estabilidad	Características
100-80	I	Taludes totalmente estables, sin ningún signo de inestabilidad visible ni depósitos de ningún tipo en su pie. Estos taludes no presentarán bloques sueltos ni caídas, incluso ligeras, de cantos.
80-60	II	Taludes estables, sin ningún signo de inestabilidad importante, más allá de leves acumulaciones de depósitos finos en su pie.
60-40	III	Taludes que presenten algún tipo de inestabilidad de escasa o media importancia como: bloques caídos de tamaño decimétrico, o presencia de paquetes en voladizo. El grado de estabilidad II será
40-20	IV	Taludes con evidentes signos de inestabilidad como: bloques caídos de gran tamaño, bloques en situación inestable en la ladera, importantes grietas en coronación, signos de eventos recientes de rotura.
20-0	V	Taludes en los que ya se haya producido algún fenómeno importante de inestabilidad.

3.3.4. Clasificación geomecánica para macizos rocosos volcánicos

Las clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos son herramientas muy utilizadas por los profesionales para la obtención de parámetros geomecánicos necesarios en el proyecto y diseño en la ingeniería de taludes. Con frecuencia, las clasificaciones disponibles resultan poco prácticas en los terrenos volcánicos, pues no llegan a recoger todas las singularidades de este tipo de materiales, por lo que su aplicación, aunque útil, tiene un éxito parcial. Por tal motivo, el proyecto MACASTAB pretende poner a disposición de los técnicos una clasificación geomecánica exclusiva para macizos rocosos volcánicos. Este trabajo ha sido encomendado a un equipo de expertos del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Ministerio de Fomento, Gobierno de España), integrado por el Dr. Mauro Muñoz y D. Javier González-Gallego. Estos expertos han ideado una clasificación (Muñoz & González-Gallego, 2018) que permite valorar la estabilidad de taludes en macizos rocosos volcánicos a partir de un conjunto de parámetros que están siendo verificados con la práctica. Los parámetros empleados han sido los siguientes: Resistencia de la roca; Tamaño de bloque; Estado de las juntas; Índice de heterogeneidad (IH); Altura del talud; Ángulo del talud; Regularidad de la cara del talud; Tamaño del bloque inestables; Espesor de las capas; Buzamiento de las juntas.

Con una configuración similar al RMR (Bieniawski, 1989), los autores asignan un valor numérico a la valoración de cada parámetro, para sumarlos todos y obtener un número final para el talud estudiado. Con el número obtenido, se puede establecer el grado de estabilidad del talud aplicando la tabla 7.

4. AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020, que ha financiado a través de los Fondos FEDER el proyecto MACASTAB (código MAC/3.5b/027).

A la Consejería de Obras Públicas y Transporte del Gobierno de Canarias, que promovió, coordinó y financió la guía GETCAN-011 y lidera el proyecto MACASTAB.

Al Instituto Volcanológico de Canarias, INVOLCAN, adjudicatario del contrato para la elaboración de los

documentos del proyecto MACASTAB, trabajo que realiza a través de sus expertos, el Dr. Luis I. González de Vallejo y D^a Ana Miranda Hardisson.

A los socios del proyecto MACASTAB: el Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de la Región Autónoma de Azores, el Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de la Región Autónoma de Madeira y la Universidad de Cabo Verde.

Al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Ministerio de Fomento, Gobierno de España, especialmente a sus expertos, la Dra. Áurea Perucho, el Dr. Mauro Muñoz y D. Javier González-Gallego.

A la empresa Trazas Ingeniería S.L., adjudicataria de la redacción de la guía GETCAN-011, a su director D. Emilio Grande de Azpeitia y al equipo de expertos integrado por el Dr. Claudio Olalla Marañón (UPM), el Dr. José Antonio Rodríguez Losada (ULL) y D^a Silvia Hernández Fernández.

Al Profesor Alcibiades Serrano González, por sus brillantes aportaciones a la Geotecnia de los materiales volcánicos y por su apoyo a los proyectos desarrollados por el Gobierno de Canarias en esta materia.

5. REFERENCIAS

Barrera Morate, J.L., y García Moral, R. (2011). *Mapa Geológico de Canarias*. Santa Cruz de Tenerife: GRAFCAN.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Gobierno de Canarias GETCAN-011 (2011). *Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias*. GETCAN-011.

Ministerio de Fomento/Gobierno de España (2006). *Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de Seguridad Estructural. Cimientos (DB SE-C)*.

Ministerio de Vivienda/Gobierno de España (2006). R.D. 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, CTE. BOE, núm. 74, de 28 de marzo de 2006, pp. 11816-11831.

Muñoz Menéndez, M., y González-Gallego, J. (2018). A simple methodology for hazard assessment of slopes in volcanic rocks from the Canary Islands: First steps. MACASTAB Project. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2018, Saint Petersburg Russia, 22-26 May 2018)*.