

Grado en Geografía y Ordenación del Territorio

Curso 2023/2024



Sección de Geografía e Historia

Universidad de La Laguna

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTIMAR LA
SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA
ISLA DE LA PALMA**

**METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR ESTIMATING
SUSCEPTIBILITY TO SLOPE MOVEMENTS ON THE ISLAND OF
LA PALMA**

Trabajo realizado por: Rafael Lorenzo Morales

Dirigido por: Abel López Díez y Nerea Martín Raya

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	6
3. METODOLOGÍA	7
3.1. Etapa exploratoria.....	7
3.2. Construcción marco teórico	7
3.3. Caracterización del área de estudio	8
3.4. Cálculo de susceptibilidad de movimientos de ladera	8
3.4.1 Obtención y preparación de los datos.....	9
3.4.2 Reclasificación de valores	11
3.4.3 Integración y cálculo de la susceptibilidad	12
3.5. Fase de análisis de resultados	13
3.6. Discusión y conclusiones	14
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1 Los riesgos de origen natural en las islas Canarias	14
4.1.1 Riesgos de origen climático	15
4.1.2 Riesgos de origen geológico-geomorfológico.....	17
4.2 Métodos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera	22
5. ÁMBITO DE ESTUDIO	26
5.1 Contexto climático y biogeográfico	27
5.2 Contexto topográfico y geomorfológico	29
6. RESULTADOS	34
6.1 Análisis del mapa de susceptibilidad	34
6.2 Análisis de la susceptibilidad por municipios.....	38
6.3 Análisis de la prensa y eventos acontecidos	42
7. DISCUSIÓN	50
8. CONCLUSIONES	51
9. BIBLIOGRAFÍA	53

AGRADECIMIENTOS

El camino hasta terminar este trabajo ha sido largo, seguramente demasiado largo, pero por fin ha terminado y estoy orgulloso de haberlo logrado y, por suerte, tengo muchas personas a las que agradeceré.

A mi familia, por darme las fuerzas necesarias para terminarlo y apoyarme en todos los momentos en los que ni yo mismo confiaba en poder cerrar esta etapa. A mi padre, por darme todas las oportunidades que he necesitado y lo más importante, inculcarme unos valores de los que estoy muy orgulloso. A mi madre, por transmitirme su amor y fuerza desde donde quiera que esté, siempre en mis pensamientos. A mis otros padres, Ruperto y Beatriz, por darme su apoyo incondicional y creer en mí y mis capacidades desde el principio. A mi novia, Bea, por ser la persona que más ha luchado por convencerme de que cerrar este ciclo de mi vida era lo correcto, dejándose la piel y ayudándome en todo lo que ha podido y más, siempre con cariño y con amor. A mis amigos, por alentar me siempre y darme su apoyo a lo largo de todo este proceso. A mis tutores, Abel y Nerea, por confiar en mí desde un principio y tener paciencia conmigo, dándome todas las facilidades posibles.

Por último, agradecer a la isla de La Palma, por ser mi casa y darme la inspiración y motivación necesaria para realizar un trabajo útil y bien hecho, del que finalmente puedo decir que estoy muy orgulloso.

RESUMEN

Los movimientos de ladera, en su gran mayoría desprendimientos y pequeños deslizamientos, son sucesos bastante habituales en la isla de La Palma. Por ello, es de gran interés realizar una propuesta metodológica que estime la susceptibilidad frente a estos, analizando y caracterizando previamente los diferentes riesgos de origen natural en Canarias, haciendo hincapié en los movimientos de ladera, y, estudiando los diferentes métodos existentes para la evaluación de la susceptibilidad frente a este tipo de eventos. En este sentido, la metodología de análisis multivariante ha sido la escogida para realizar el estudio, en el que se ha calculado la susceptibilidad en base a cuatro variables ponderadas, siendo estas pendiente, litología, precipitación extrema y vegetación. El resultado principal obtenido, con el apoyo de las herramientas SIG, ha sido un mapa general de susceptibilidad, que ha determinado que los municipios con mayor peligro son Santa Cruz de La Palma y San Andrés y Sauces. Además se ha analizado que existe una mayor susceptibilidad en el sector con mayor presencia de barrancos en el noreste y en la Caldera de Taburiente, frente al sector sur y suroeste, más llano y con mayor presencia de islas bajas.

Palabras clave: movimientos de ladera, desprendimiento, susceptibilidad, metodología, SIG, La Palma.

ABSTRACT

Slope movements, mostly rock falls and small landslides, are quite common events on the island of La Palma. For this reason, it is of great interest to develop a methodological proposal to estimate susceptibility to these events, previously analysing and characterising the different risks of natural origin in the Canary Islands, with emphasis on slope movements, and studying the different existing methods for the evaluation of susceptibility to this type of event.

In this sense, the multivariate analysis methodology was chosen to carry out the study, in which susceptibility was calculated on the basis of four weighted variables, namely slope, lithology, extreme precipitation and vegetation. The main result obtained, with the support of GIS tools, was a general susceptibility map, which determined that the municipalities most at risk were Santa Cruz de La Palma and San Andrés y Sauces. It has also been analysed that there is greater susceptibility in the sector with a greater presence

of ravines in the northeast and in the Caldera de Taburiente, as opposed to the southern and southwestern sector, which is flatter and has a greater presence of low islands.

Keywords: Slope movements, rock falls, susceptibility, methodology, SIG, La Palma.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre aspectos vinculados con la Reducción del Riesgo de Desastres han cobrado mucha importancia en las últimas décadas (Roselló *et al.*, 2020; Ruangpan *et al.*, 2020; Berrang-Ford *et al.*, 2021; Gracia Pérez, 2023), promovido por un aumento no solo del número de desastres, sino también de personas afectadas, personas fallecidas y pérdidas económicas. Según un informe realizado por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), entre los años 2000 y 2019, el número de desastres registrados fue de 7348, afectando aproximadamente a 4 mil millones de personas y provocando alrededor de 1,23 millones de fallecimientos (UNDRR, 2020). En este contexto, el número de desastres relacionados con movimientos de ladera en estas dos décadas, sumando los provocados por deslizamientos y los provocados por movimientos en masa, asciende a 389, lo que supone un porcentaje pequeño, el 6 %, del total de desastres de origen natural acontecidos, destacando algunos como el ocurrido en Santa Tecla, El Salvador en el 2001 (Codina & Thomatis, 2005) o los deslizamientos en el norte de la India en 2013 (Martha *et al.*, 2015).

Pese a ser una de las tipologías de desastres menos frecuentes, los movimientos de ladera, en concreto los deslizamientos, cuentan con numerosos estudios a nivel global, donde se realizan desde análisis globales (Nadim *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2015; Broeckx *et al.*, 2020), hasta otros más concretos como el análisis de la relación entre los deslizamientos y el cambio climático (Gariano & Guzzetti, 2016 y Jakob, 2022). Asimismo, existen múltiples trabajos que buscan caracterizar la susceptibilidad que puede experimentar un área determinada ante este tipo de fenómenos, a nivel global, en regiones amplias del mundo existen estudios enfocados a la susceptibilidad frente a movimientos de ladera en sectores como Irán o en los montes de Portofino, Italia (Emami *et al.*, 2020 y Roccati *et al.*, 2021). De igual manera, estos estudios han dado mayor importancia a caracterizar los deslizamientos frente a los desprendimientos u otros tipos de dinámicas de ladera, hecho este último que, a mayor nivel de escala, como la escala nacional y sobre todo a escala del archipiélago canario, cambia.

A nivel nacional, los movimientos de ladera han sido tratados en diferentes estudios de forma general (Corominas, 2006; Delgado *et al.*, 2013; Herrera *et al.*, 2017) y en varios estudios de susceptibilidad frente a movimientos de ladera a nivel regional como en la Comunidad Autónoma de Andalucía (Fernández *et al.*, 2016 y Perálvarez, 2021), la Región de Murcia (De la Peña, 2016); Comunidad Valenciana (Szeibert *et al.*, 2022) o el País Vasco (Ormaetxea Arenaza & Sáenz de Olazagoitia Blanco, 2017). Centrándonos en los estudios sobre susceptibilidad frente a movimientos de ladera en el archipiélago Canario, los desprendimientos, principalmente, y los pequeños y medianos deslizamientos, focalizados en Gran Canaria (Lomoschitz & Corominas, 1997 y Hérvas *et al.*, 2002), han sido un gran punto de interés dentro de la susceptibilidad frente a movimientos de ladera. Como estudio más reciente, sirve de principal referencia en este campo de estudio el realizado en el Macizo de Anaga, Tenerife (López Díez *et al.*, 2015), aunque cabe señalar otros trabajos anteriores que abordan el tema de los movimientos de ladera en el archipiélago (Lomoschitz & Corominas, 1997 y Yepes *et al.*, 2011).

No obstante, aún son pocos los estudios para caracterizar la susceptibilidad frente a movimientos de ladera en Canarias, por ello, surge la necesidad de un estudio de susceptibilidad frente a movimientos de ladera en la isla de La Palma, siguiendo una metodología de análisis multivariante, dado que se analiza la susceptibilidad mediante a la unión de las diferentes variables principales que propician los movimientos de ladera: pendiente, litología, precipitaciones y vegetación. El desarrollo de este método nos dará como resultado principal una zonificación de los diferentes niveles de susceptibilidad frente a movimientos de ladera existentes en La Palma, pudiendo identificar cuáles son las zonas más propensas a la ocurrencia de dicho fenómeno.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es calcular y analizar la susceptibilidad frente a movimientos de ladera en la isla de La Palma. De la misma forma, para poder alcanzar este objetivo principal, se han llevado a cabo varios objetivos secundarios:

- Construir un marco teórico que nos ayude a desarrollar el trabajo, fundamentado en dos temas principales. Primero, la caracterización de los principales riesgos de origen natural que se dan en Canarias, con especial atención en los movimientos de ladera y, segundo, el estudio de diferentes métodos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera.

- Contextualizar geográficamente el territorio a estudio, caracterizando desde el punto de vista climático, biogeográfico, topográfico y geomorfológico la isla de La Palma.
- Definir cuáles son las principales variables que intervienen a la hora de desencadenar los movimientos de ladera en La Palma.
- Realizar un inventario de eventos acontecidos en La Palma, con el fin de comprobar la eficacia de la metodología empleada y corroborar que los resultados obtenidos se asemejan a la realidad.

3. METODOLOGÍA

Este apartado cumple la función de describir que etapas se han ido llevando a cabo en la formación del trabajo. Dichas etapas han sido ordenadas en orden cronológico y están orientadas a cumplir los objetivos propuestos. La secuencia metodológica ha sido esquematizada de esta manera (Figura 1).

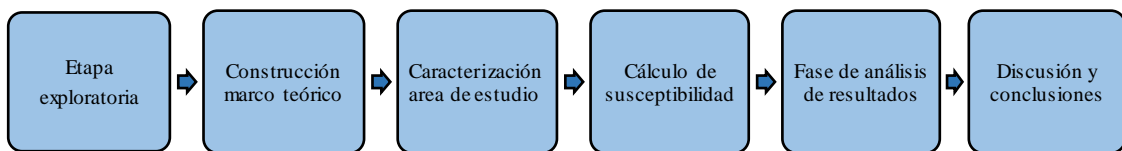


Figura 1. Secuencia de etapas metodológicas. Elaboración propia

3.1. Etapa exploratoria

En esta etapa primeriza de exploración, se ha decidido el tema de estudio tras valorar diferentes opciones. La elección de esta idea surge de la necesidad de realizar un estudio acerca de la susceptibilidad frente a los movimientos de ladera en la isla de La Palma, cuestión que se ha realizado en otras áreas de estudio dentro del Archipiélago canario, como son el Macizo de Anaga o la isla de El Hierro. Plantear una completa y eficiente recogida de información, tanto para la construcción del marco teórico como la de la metodología, ha sido muy importante en esta primera fase, al igual que el planteamiento de los objetivos.

3.2. Construcción marco teórico

La etapa que sigue a la primera fase exploratoria se centra en la construcción de un marco teórico. La revisión bibliográfica de diversos trabajos científicos que apoyaran de forma sólida el estudio en general y, en concreto la metodología seguida ha sido fundamental para el buen desarrollo del trabajo. Asimismo, la estructura que se ha llevado a cabo para

realizar un marco teórico que contextualice de forma adecuada lo planteado en el trabajo se basa en dos ejes principales. Primero, abordar de forma general como se ha llevado a cabo históricamente el estudio de los riesgos de origen natural en Canarias, al igual que caracterizarlos haciendo especial hincapié en los movimientos de ladera. Por su parte, el segundo eje se ha centrado en abordar el estudio de diferentes métodos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera, con el fin de poder llegar a entender bien cuál es la metodología adecuada a seguir en este trabajo.

3.3. Caracterización del área de estudio

En esta etapa se lleva a cabo una caracterización general del área de estudio, la isla de La Palma, teniendo en cuenta su contexto geográfico. Realizar una visión general sobre el clima, la vegetación y sobre todo de la geomorfología resulta muy importante por ser factores que condicionan la ocurrencia de los movimientos de ladera en gran medida. Los principales rasgos que en los que se profundiza en este apartado son la delimitación de las grandes pendientes existentes en la isla y cómo condicionan a la ocurrencia del fenómeno de movimientos de ladera; la distribución tanto de las precipitaciones como de la vegetación y cómo la presencia o no de esta determina la mayor o menor aparición de los movimientos, y la distinción de unidades litológicas, que desempeñan un papel condicionante en el nivel de susceptibilidad a los movimientos de ladera. Es importante señalar que todo lo que se va a nombrar en esta área de estudio sirve para comprender mejor el peligro de movimientos de ladera y nos ayuda a poder entender los resultados obtenidos en este trabajo.

3.4. Cálculo de susceptibilidad de movimientos de ladera

La estimación de la susceptibilidad de los movimientos de ladera se constituye como un elemento complejo determinado por diferentes variables. En este sentido, aplicando sistemas de información geográfica (SIG), y mediante una metodología semicuantitativa, se ha desarrollado una secuencia metodológica, con el fin de realizar un mapa de susceptibilidad frente a movimientos de ladera en La Palma: dividida en 3 pasos: (1) Obtención y preparación de datos; (2) reclasificación de valores e (3) integración y cálculo de la susceptibilidad. Por ello, para realizar un análisis espacial detallado se han utilizado varios factores considerados como condicionantes básicos para su desencadenamiento (pendiente, precipitación, litología y vegetación) utilizados previamente en otros trabajos científicos con objetivos similares (López-Díez *et al.*, 2015).

3.4.1 Obtención y preparación de los datos

El primer paso ha sido obtener y preparar los datos necesarios relacionados con la pendiente, litología, precipitación extrema y vegetación que servirán para realizar el análisis de susceptibilidad (Figura 2).

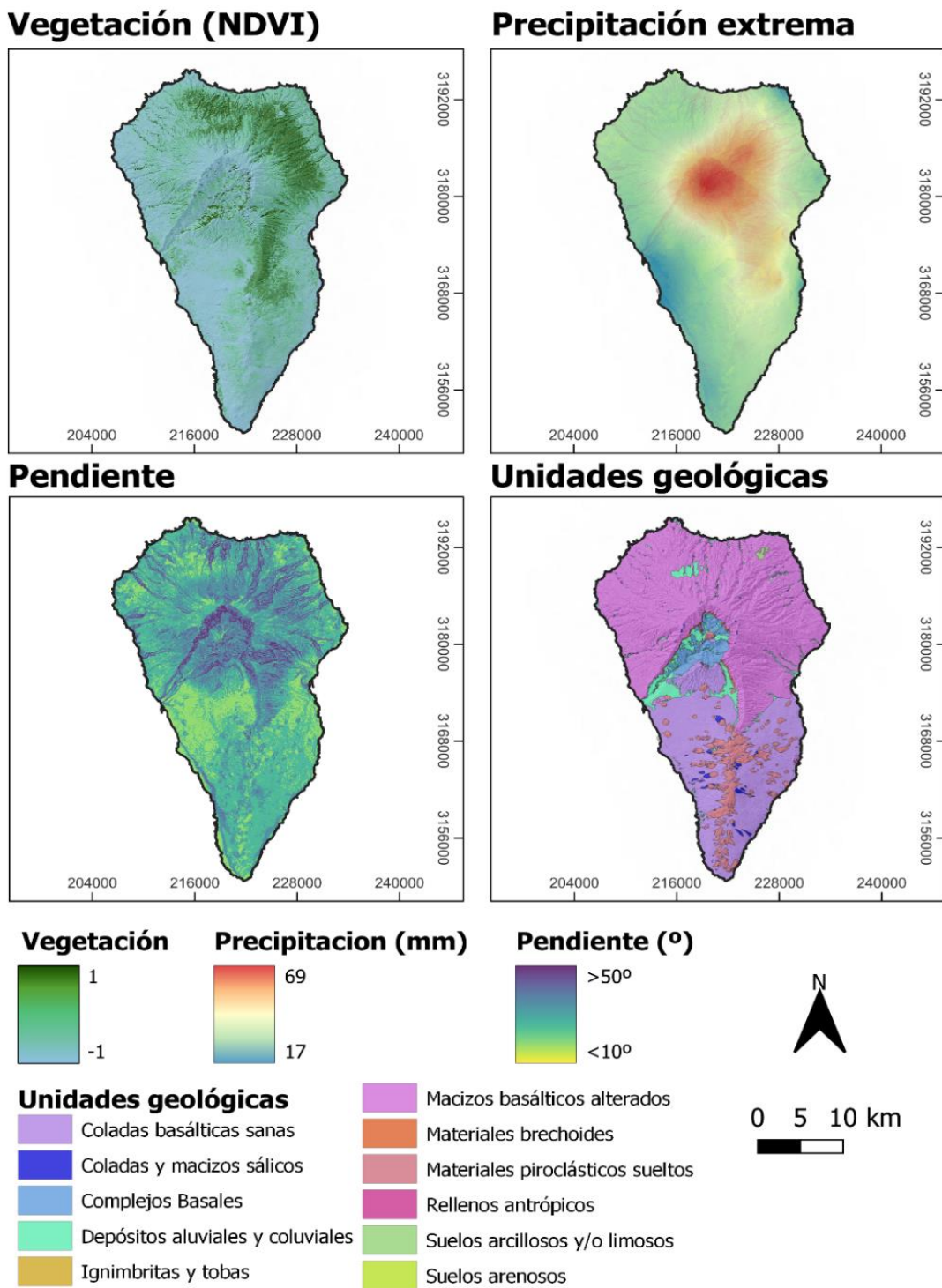


Figura 2. Mapa de representación de las capas iniciales. Unidades geológicas, pendiente, precipitaciones extremas y vegetación. Elaboración propia.

En primer lugar, la pendiente se ha obtenido a partir del Modelo Digital de Elevaciones con resolución de 5 m (MDT05) de la isla de La Palma disponible en el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2023) y actualizado con la nueva topografía creada tras la erupción de 2021 con los espesores de colada disponibles en el Open Data de La Palma (Cabildo de La Palma, 2023).

Por su parte, la litología ha sido obtenida a través del Mapa Geotécnico de Canarias 1:25.000 descargado del Sistema de Información Territorial de Canarias (SITCAN, 2023). Hay que tener en cuenta que la reciente ocurrencia de la erupción acontecida en la isla hace que esta información tampoco se encuentre actualizada. Sin embargo, teniendo en cuenta la clasificación geológica que se hace en este de las erupciones históricas de la isla, se ha considerado que la unidad geotécnica a la que corresponden los nuevos materiales es la misma que los definidos en el Mapa Geotécnico oficial sin actualizar para otras coladas históricas: “coladas basálticas sanas”.

Por otro lado, en cuanto a la precipitación, son los episodios extremos los que contribuyen al desencadenamiento de desprendimientos (Leyva *et al.*, 2022). Por ello, para esta capa de información se han utilizado los valores extremos de precipitación máxima diaria de cada estación meteorológica de La Palma. En este sentido, utilizando los valores del percentil 99 se ha realizado una interpolación mediante *kriging* para determinar espacialmente el grado de intensidad de las precipitaciones.

Por último, ante la indisponibilidad de un mapa de vegetación de Canarias público y descargable, se ha utilizado el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) el cual se ha convertido en una herramienta eficaz y precisa que contribuye a observar la cobertura de la vegetación de manera detallada (Di Benedetto *et al.*, 2022). Este índice se calcula a través de imágenes satélite utilizando las bandas rojas (R) e infrarrojo cercano (NIR), en este caso procedente de Sentinel (bandas 4 y 8A), mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde los valores más próximos a 1 corresponden con coberturas vegetales muy densas y los valores cercanos a -1 con suelos desprovistos de vegetación.

3.4.2 Reclasificación de valores

Después de obtener las capas de información básicas, es necesario realizar una reclasificación que establezca cuales son los intervalos más adecuados para definir la mayor o menor peligrosidad. Para ello, este trabajo se ha apoyado en la metodología desarrollada por López-Díez *et al.* (2015), y ha seguido unos criterios determinados para asignar el grado de peligrosidad de los valores de cada variable.

La pendiente es uno de los factores más utilizados en la evaluación de la susceptibilidad de movimientos de ladera (Santacana *et al.*, 2002). Cuanta mayor pendiente más peligrosidad (Tabla 2), y viceversa, dado que, cuando esta es mayor, la componente de cizalla de las fuerzas que actúan en la superficie potencial de rotura es más elevada (Jones *et al.*, 1961).

En la capa de litología, al ser valores cualitativos es necesario realizar una agrupación en función del nivel de potencialidad a los movimientos de ladera (Tabla 1). Cuando estamos hablando de estructuras litológicas, el grado de compactación del material resulta clave para determinar la susceptibilidad frente a movimientos de ladera (López-Díez *et al.*, 2015). Del mismo modo, la variabilidad de resistencia de los distintos tipos de roca a la meteorización y a la erosión es muy importante, ya que estas variaciones son claves para determinar la antes mencionada fuerza de cizallamiento, tanto la permeabilidad o susceptibilidad a la erosión (Berchiche & Guettouche, 2018). Las unidades geológicas han sido agrupadas en función de la potencialidad de estas de sufrir algún tipo de movimiento de ladera, diferenciándolas entre potencialidad alta, media y baja. Dentro de la primera se han agrupado aquellos materiales que presentan un escaso grado de compactación, tales como materiales piroclásticos sueltos, ignimbritas y tobas, depósitos aluviales y coluviales, suelos arenosos, complejos basales, macizos basálticos alterados, suelos arcillosos, materiales brechoides, rellenos antrópicos. En el grupo intermedio aquellos materiales de naturaleza compacta pero que actualmente presentan cierto grado de transformación como las coladas basálticas con niveles piroclásticos subordinados. Por potencialidad baja se entienden aquellos materiales con un fuerte nivel de compactación, tales como los diferentes tipos de coladas basálticas, fonolíticas y coladas y macizos sálicos (Tabla 1).

Unidades geológicas	Potencialidad	Valor
Materiales Piroclásticos sueltos, ignimbritas y tobas, depósitos aluviales y coluviales, suelos arenosos, complejos basales, macizos basálticos alterados, suelos arcillosos, materiales brechoides, rellenos antrópicos	Alta	3
Coladas basálticas con piroclastos subordinados	Media	2
Coladas y macizos sálicos, coladas basálticas y fonolíticas	Baja	1

Tabla 1. Reclasificación de unidades geológicas. Elaboración propia.

Por su parte, la precipitación se ha reclasificado teniendo en cuenta que la mayor cantidad de milímetros precipitados supone una mayor peligrosidad (Tabla 2), debido a que, durante los episodios de lluvias intensas, el contenido de agua en la roca reduce la cohesión de la misma, y provoca un aumento de peso en la roca que favorece las fuerzas gravitacionales y facilita las inestabilidades (Goumrasa *et al.*, 2021).

Por último, en cuanto a la vegetación, se entiende que aquellas zonas con vegetación densa suponen una menor susceptibilidad por la estabilización que esta aporta a los taludes, mientras que las zonas sin presencia o escasa vegetación están más expuestas a la erosión (Santamarta Cerezal & Naranjo Borges, 2015). Así que teniendo en cuenta los valores del NDVI y la clasificaciones realizadas en otros trabajos con objetivos similares (Goumrasa *et al.*, 2021) se han establecido las clases resultantes, adaptadas a la zona de estudio (Tabla 2).

Factores	Clases	Niveles
Pendiente	0-10	1
	10-25	2
	25-40	3
	40-50	4
	50<	5
Litología	Potencialidad baja	1
	Potencialidad Media	2
	Potencialidad Alta	3
Precipitaciones extremas	< 25 mm	1
	25-35 mm	2
	35-45 mm	3
	45-55 mm	4
	55 <	5
Vegetación(NDVI)	>0.7	1
	0.35-0.7	2
	0-0,35	3
	<0	4

Tabla 2. Reclasificación de valores y definición de niveles de peligrosidad. Elaboración propia.

3.4.3 Integración y cálculo de la susceptibilidad

El tercer paso realizado es integrar las capas de información con el fin de obtener el resultado final de peligrosidad de movimientos de ladera en La Palma. No obstante, hay

que tener en cuenta que las variables utilizadas en este trabajo influyen con diferente importancia en la ocurrencia o desencadenamiento de los movimientos de ladera, por lo que esto se debe tener en cuenta al realizar la integración con el fin de obtener un resultado más preciso. La importancia asignada a los valores utilizados en este trabajo es similar a los utilizados por López-Díez *et al.* (2015), aunque adaptados al territorio y escala trabajada. En primer lugar, sin ninguna duda el elemento que más determina la susceptibilidad es la pendiente del terreno, tal y como ha demostrado Santacana *et al.* (2002) y otros trabajos similares (Huang *et al.*, 2022). Por su parte, la litología y la precipitación siguen a la pendiente, debido a que la cohesión de los materiales y su resistencia a la erosión resultan importantes para determinar la susceptibilidad de movimientos de ladera (López-Díez *et al.*, 2015). Por último, la cobertura vegetal cada vez se usa más para medir la susceptibilidad de movimientos de ladera (Martha *et al.* 2013; Javier and Kumar 2019; Tang *et al.*, 2020) ya que puede matizar los resultado del resto de variables.

Teniendo en cuenta esto, las capas han sido ponderadas en función de su importancia siguiendo la siguiente fórmula:

$$S_{x,y,z} = P(0,40)x_{y,z} + L(0,25)x_{y,z} + Pr(0,25)x_{y,z} + V(0,10)x_{y,z}$$

S: Susceptibilidad P: Pendiente L: Litología Pr: Precipitación extrema V: Vegetación

3.5. Fase de análisis de resultados

Esta etapa se ha caracterizado por realizar un análisis en profundidad de los datos resultantes de nuestro trabajo. Entender y valorar los datos estadísticos y su contexto dentro del área de estudio ha sido posible principalmente por el uso de SIG, que nos ha facilitado realizar mapas y tablas con los que se ha analizado de forma más eficiente los datos obtenidos, destacando como resultado principal el mapa de susceptibilidad frente a movimientos de ladera en la isla de La Palma.

La cartografía principal resultante muestra la susceptibilidad frente a movimientos de ladera, que se ha clasificado a través de intervalos definidos por cuartiles: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Además, previamente, se realiza un análisis del resultado secundario relativo a los mapas de nivel de peligrosidad de las 4 variables a estudio. Para completar estos resultados, se ha realizado un análisis a nivel de municipios de la susceptibilidad frente a movimientos de ladera, clasificándolos según su nivel propensión medio a través de intervalos nuevamente definidos por cuartiles: muy baja, baja, media,

alta y muy alta. Con esta clasificación se determina cuáles son los que sufren un mayor nivel de peligrosidad y su distribución espacial en la isla de La Palma. Para ello, la obtención de los porcentajes representativos de cada uno de los niveles de peligrosidad en cada municipio se presenta como la mejor herramienta para llevar a cabo este análisis, culminando el proceso con la realización de tablas que apoyen los resultados obtenidos. Finalmente, un pequeño repaso a acontecimientos sucedidos en la isla relacionados con los movimientos de ladera, recopilados principalmente en la prensa, nos permite validar los resultados obtenidos.

3.6. Discusión y conclusiones

Esta última etapa que cierra la secuencia metodológica que presenta el trabajo se ha centrado en realizar una discusión de los aspectos más interesantes que se han logrado vislumbrar con el desarrollo del estudio, centrada principalmente en los resultados que se han obtenido. Asimismo, con el fin de responder y satisfacer los objetivos propuestos, se han desarrollado unas conclusiones.

4. MARCO TEÓRICO

Para la consecución de los objetivos anteriormente descritos, se presenta un marco teórico estructurado en dos ejes que pretenden: en primer lugar, caracterizar los principales riesgos de origen natural que se dan en el archipiélago canario, con especial énfasis en los movimientos de ladera; y, en segundo lugar, se aborda el estudio de diferentes métodos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera.

4.1 Los riesgos de origen natural en las islas Canarias

Las islas Canarias han sido afectadas históricamente por multitud de desastres de origen natural que han dado lugar a importantes disrupciones sociales, económicas y ambientales. No obstante, comparativamente con otras regiones del planeta, el archipiélago canario se sitúa en un ámbito geográfico de relativa tranquilidad fuera del alcance de amenazas que presenten una alta intensidad y recurrencia como podrían ser ciclones tropicales, sismos o erupciones volcánicas de carácter explosivo. Sin embargo, aunque las islas Canarias no son afectadas por eventos con una elevada peligrosidad, no se puede obviar que la existencia de procesos naturales propios de ecosistemas insulares, unido a la naturaleza volcánica del archipiélago canario, la dependencia del sector turístico, la alta presión demográfica sobre el territorio e incluso los efectos del cambio climático (Dorta *et al.*, 2018) dan lugar a que sea una región con una alta exposición y

vulnerabilidad (López-Díez *et al.*, 2021), produciendo los denominados paisajes de riesgo (Olcina, 2022). A continuación, se presentan los principales riesgos de origen natural agrupándolos en función de su génesis.

4.1.1 Riesgos de origen climático

Los principales desastres de origen natural sucedidos en Canarias se relacionan, principalmente, con precipitaciones intensas y erupciones volcánicas (López Saavedra *et al.*, 2022), sin dejar de reseñar la importancia creciente de los grandes incendios forestales. Sin embargo, han sido los primeros el principal foco de investigación dentro de la temática de riesgos de origen natural en Canarias, (López-Díez *et al.*, 2022). Este campo de estudio que con el paso de los años ha ido cobrando una cierta importancia en el archipiélago canario, gracias al trabajo de múltiples investigadores debido a que son, cuantitativamente, los que más pérdidas humanas y económicas han ocasionado, por lo que suponen una amenaza constante y en aumento, siendo no del todo real la imagen de un clima agradable y apacible del archipiélago (Dorta, 2007).

El estudio del clima, especialmente durante la segunda mitad del siglo XX y principios del XXI, ha servido como base y ha estado asociado a los inicios del estudio de las amenazas climáticas, diversos estudios han fortalecido esta línea de investigación en el territorio canario. Por ejemplo, trabajos realizados desde el campo de la meteorología en la década de los cincuenta sobre cuestiones generales del clima canario y las invasiones de aire sahariano por Font Tullot (1956) o la realización por parte de André Huetz de Lempz a finales de los sesenta de una obra general sobre el clima de Canarias que trataba del origen y la evolución de los episodios de precipitaciones intensas en el archipiélago (Huetz, 1969). Más adelante se realizan trabajos en los que por primera vez se estudian los episodios de lluvia intensa asociados a los temporales en Canarias, por parte de María Victoria Marzol Jaén (1988 y 1989), en los que se comienza a destacar la importancia del riesgo de inundación en las islas. Otro trabajo destacado que aborda directamente la temática es el catálogo de Dorta (2007) sobre riesgos climáticos en Canarias, en el que se exponen los principales eventos que han ocurrido en el archipiélago. Aquí, se analizan, explican y ejemplifican los cinco principales riesgos de origen climático en Canarias: las lluvias intensas y torrenciales, las sequías, los vientos fuertes, las olas de calor y las advecciones de polvo sahariano.

Las lluvias intensas y torrenciales son precipitaciones de elevada intensidad horaria y abundante caudal propiciadas por fenómenos de inestabilidad atmosférica que, sumadas a las características geomorfológicas del terreno, en concreto a los importantes desniveles, pueden llegar a tener un alto poder destructivo (López-Díez *et al.*, 2021a). Estas pueden causar graves inundaciones y deslizamientos de tierra en las zonas montañosas y costeras, lo que puede resultar en daños a la infraestructura, pérdida de vidas humanas y animales, y una degradación del medio ambiente. Además, en las zonas urbanas, estas lluvias pueden causar graves daños a la propiedad, así como interrupciones en el suministro de energía y agua. Múltiples han sido los desastres de origen climático que históricamente han asolado a las Islas Canarias, desde el conocido aluvión de 1826, las inundaciones de 1957 en La Palma o las del 31 de marzo de 2002 en Santa Cruz de Tenerife, todos ellos presentando numerosos daños sobre las personas, bienes y servicios (López-Díez *et al.*, 2018).

Las sequías en Canarias constituyen otro riesgo climático de gran frecuencia e importancia complejo de analizar por la diversidad territorial existente en las islas y la variabilidad entre años muy secos y años lluviosos. La falta de lluvias es un fenómeno común en las islas, especialmente, si tenemos en cuenta que nos encontramos en un régimen de precipitación mediterráneo, con una marcada estacionalidad, (López-Díez *et al.*, 2021b).

Los temporales de viento no son un fenómeno muy estudiado en Canarias, seguramente por su frecuencia muy irregular. Los vientos procedentes del sureste se manifiestan potencialmente como los más peligrosos, ya que la mayoría de las infraestructuras de las islas no están preparadas frente a ellos, por su antes mencionada poca frecuencia (Dorta, 2007). Por ello, aunque los temporales relacionados con las borrascas atlánticas son los más habituales, estos serían los vientos que han podido generar más daños en el archipiélago. El ejemplo históricamente más destacado es el del temporal de viento de enero de 1999 (Criado & Dorta, 2003).

Las olas de calor en Canarias se caracterizan por temperaturas muy altas, con máximas que pueden superar los 40 grados y valores de humedad relativa por debajo del 15%, con una duración de hasta semanas en algunos casos. Además, están directamente relacionadas con la llegada a las islas de masas de aire sahariano en los meses más cálidos (Dorta, 2007). La relación entre estas olas de calor y los incendios forestales es más que

evidente, coincidiendo casi en su totalidad las olas de calor extremas con los incendios más importantes acontecidos en Canarias, teniendo ejemplos de los cuales son los tres incendios simultáneos que acontecieron en el archipiélago en el verano de 2007 (Dorta *et al.*, 2020). Las olas de calor más destacables en la historia de Canarias son la de 1976, entre los días 5 y 15 de agosto, y la de 2004, entre los días 23 y 29 de julio, según un estudio realizado por la AEMET sobre las olas de calor en España desde 1975. También si nos centramos en los últimos años, los veranos de 2020 y 2023 han tenido olas de calor importantes, siendo la de agosto de 2023 muy calurosa ya que se llegó a alcanzar más de 40 C° en muchos puntos del archipiélago. En este mismo año también se ha registrado una ola de calor en la primera quincena de octubre, destacable tanto por las fechas en las que se dio como por su duración.

Las advecciones de polvo sahariano en Canarias son un fenómeno meteorológico que ocurre con cierta frecuencia durante el año, especialmente en invierno. Se trata de una masa de aire cálido y seco procedente del desierto del Sáhara y se desplaza hacia el oeste, llegando a las islas Canarias. Las repercusiones que pueden llegar a tener las advecciones de polvo sahariano van desde generar dificultades en la comunicación aérea en las islas, por la disminución de visibilidad, como a influir en el desarrollo de diferentes enfermedades respiratorias (Dorta, 2007). Episodios de entrada masiva de polvo sahariano reseñables fueron los de abril de 2002, febrero de 2004, julio de 2005 y enero de 2008 (Bethencourt & Dorta, 2010). Recientemente destaca también el episodio de febrero de 2020.

4.1.2 Riesgos de origen geológico-geomorfológico

Desde el punto de vista geológico y geomorfológico, en Canarias los riesgos de origen natural se relacionan principalmente con el vulcanismo, siendo junto a los antes mencionados riesgos de origen climático los principales causantes de importantes pérdidas presentes en Canarias (Dorta *et al.*, 2020). No obstante, en términos generales, los peligros geológicos en Canarias son moderados. El propio marco geográfico y geodinámico y la configuración de las islas restringen la probabilidad de ocurrencia de terremotos de grandes magnitudes o erupciones altamente explosivas. Los riesgos geológicos reales y con previsible incidencia a escala humana (los próximos cien años) se limitan a desprendimientos y erupciones volcánicas de relativa baja frecuencia y peligrosidad (Barrera & García, 2011). De este modo, los principales riesgos geológicos en Canarias se podrían agrupar en los siguientes grupos: riesgo sísmico (asociado en la

mayoría de los casos a volcanismo); riesgo volcánico (erupciones volcánicas de baja frecuencia y peligrosidad) y riesgos estructurales o geomorfológicos (deslizamientos y desprendimientos normalmente relacionados con episodios de lluvias intensas).

Diversos autores han abordado la temática de los riesgos naturales asociados al vulcanismo insular en estudios generales como el caso de Juan Carlos Carracedo (2005, 2011), en los que se aborda las posibles amenazas volcánicas dentro de un estudio sobre el origen y evolución del vulcanismo en Canarias, y también, estudios más concretos, como el de Javier Dóniz (2010), analizando el vulcanismo basáltico monogénico de Tenerife y sus posibles riesgos, o los estudios de Carmen Romero sobre las erupciones históricas del archipiélago (Romero, 1990).

El tratamiento que han recibido los riesgos geomorfológicos dentro del estudio de los riesgos naturales en Canarias no es acorde a la variedad y cantidad de procesos de esta índole presentes en el archipiélago. El pionero en Canarias en estudiar los fenómenos asociados a movimientos de ladera es considerado H. Hausen, publicando en 1970 un artículo en el que analiza el fenómeno de desprendimientos en cada una de las islas. Los primeros estudios destinados a los movimientos gravitatorios los vemos centrados en los deslizamientos localizados en la depresión de Tirajana en Gran Canaria (Lomoschifz & Corominas, 1997 y Lomoschifz, 2002), ya que hay que tener en cuenta que Gran Canaria es la isla en la que estos procesos están más presentes; encontrando múltiples puntos en los que existe riesgo de desprendimiento y también de deslizamientos en las depresiones erosivas de Tirajana, Tenteniguada y Tejeda, entre otras. Posteriormente, se realizaron estudios de caso sobre movimientos de ladera en el Macizo de Anaga, Tenerife. Son los casos de los autores J. Yepes, desde una visión técnica (Yepes, 2011 y 2012) y López-Díez *et al.* (2015), enfocado a elaborar una metodología para determinar el grado de susceptibilidad del Macizo de Anaga. También se han estudiado los fenómenos geomorfológicos como factor de dinámica en la laurisilva de Anaga (Arozena & Panadera, 2010). Además, los estudios han saltado a otras islas como por ejemplo el estudio sobre la susceptibilidad de desprendimiento de rocas en la isla de El Hierro (Fernández Hernández *et al.*, 2012). En los últimos años se han elaborado estudios también en esta isla (Leyva *et al.*, 2022), relacionados con los desprendimientos de rocas, existiendo también otros a nivel general de Canarias (Melillo *et al.*, 2020).

Los grandes deslizamientos relacionados con el vulcanismo son los que se han llevado la mayor atención por parte de los científicos (Mora-Figueroa, 2015). Aunque el presente trabajo está centrado en los pequeños y medianos movimientos de ladera de la isla de La Palma, en el archipiélago se han producido también deslizamientos y desprendimientos que han tenido volúmenes de materiales desplazados del orden de 0,2 a 1,3 km³ (Barrera, 2011). Algunos ejemplos que encontramos en las islas son: el deslizamiento cuaternario de la depresión de Tirajana, en Gran Canaria, o los deslizamientos del flanco insular existentes en las islas occidentales de Tenerife, El Hierro y La Palma, en la que destacamos al ser el área de estudio los deslizamientos de La Playa de la Veta, Cumbre nueva y Santa Cruz (Mora Figueroa, 2015). Sin embargo, estos eventos son poco probables a escala temporal humana, al contrario que los desprendimientos causados en su mayoría por las lluvias y en menor medida por los terremotos, que son un fenómeno muy habitual en Canarias. La zonificación de estos procesos en el archipiélago canario está descrita en la memoria del Mapa Geológico de Canarias (2011). Las islas que cuentan con más volumen de desprendimientos y deslizamientos son: Gran Canaria, donde las zonas de riesgo de desprendimiento son abundantes, destacando los barrancos de la costa sur occidental; Tenerife, centralizados estos movimientos de ladera en las áreas de grandes relieves, el Macizo de Anaga, y el Macizo de Teno principalmente y, también, en el valle de la Orotava; y El Hierro, donde los desprendimientos se focalizan principalmente en la zona de El Golfo. La Palma, lugar en el que se centra nuestro estudio, también tiene zonas proclives a experimentar movimientos de ladera, en su gran mayoría, desprendimientos. Estos desprendimientos están centrados en la caldera de Taburiente, siendo constante la caída de piedras durante todo el año. La senda que va desde el mirador de Los Brecitos hasta la zona de acampada de la playa de Taburiente y la senda conocida como “El Reventón” están consideradas especialmente peligrosas debido a este riesgo de desprendimientos (IGME, 2011).

Para entender la sucesión de los movimientos de ladera, es importante comprender y explicar qué son, su clasificación y los factores que los desencadenan. Un movimiento de ladera es un proceso por el cual un material terrestre es desplazado por la acción de la gravedad, sin que exista una intervención directa del agua, hielo o viento. En los movimientos de laderas destacan tres características principales: son procesos que actúan frecuentemente en masa, es decir, sin selección de los materiales erosionados, transportados y depositados o, en todo caso, con una selección más baja que la producida

por otros agentes como el agua o el viento; son procesos asociados a laderas, en la mayoría de casos, donde la gravedad presenta normalmente una energía potencial mayor; y por último, estos procesos se encuentran en numerosas ocasiones asistidos por agentes geomorfológicos como el agua, el hielo o el viento, siendo el principal agente movilizador de materiales la gravedad (Lario *et al.*, 2017).

Por otro lado, para comprender mejor los mecanismos que influyen en los movimientos de ladera hay que tener en cuenta y diferenciar entre factores determinantes y factores desencadenantes (Crozier, 1986). Los primeros son factores estáticos, que abarcan todos los aspectos del medio físico que establecen la inestabilidad de una ladera, factores intrínsecos al material como son la litología, las propiedades geomecánicas y también la estructura y textura de los materiales. Son igual de importantes los factores determinantes considerados como extrínsecos y relacionados con la topografía, como son la elevación, la pendiente y la exposición de las vertientes, sin olvidar el papel que toma la localización geográfica. En cambio, los factores desencadenantes son los que inician el movimiento y activan la movilización de la vertiente inestable, como pueden ser fluctuaciones rápidas del nivel freático, precipitaciones intensas o acumuladas, terremotos, o cambios geométricos producidos por procesos naturales o antrópicos (Boussouf *et al.*, 1994).

Condicionados por estos factores, los movimientos de laderas pueden tener características que los diferencian entre ellos. Por ello, las clasificaciones de los movimientos de ladera que se han realizado se basan en el tipo de mecanismo (mecanismos de rotura que dan pie a que exista una rotura de material y mecanismos de propagación, los cuales controlan la propagación del movimiento) y en el tipo de material involucrado (diferenciando la roca del suelo, siendo el primero una masa de material compacto y el segundo un agregado de partículas y fragmentos de roca, transportado con líquidos y gases intersticiales), así como el contenido en hielo, agua y aire, su morfología y propiedades geotécnicas del depósito, velocidad y edad del movimiento, grado de actividad, localización geográfica y los factores, tanto los condicionantes como los desencadenantes. (Lario *et al.*, 2017).

Por tanto, teniendo en cuenta todas estas características, se diferencian los siguientes tipos de movimientos de ladera (Varnes, 1978 y Gutiérrez Elorza, 2008) (Tabla 3).







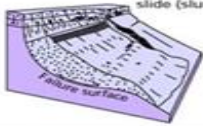
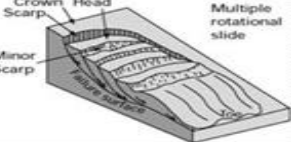

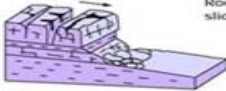


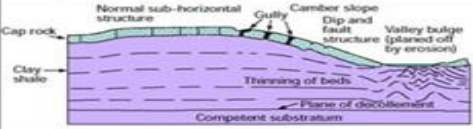

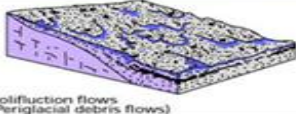



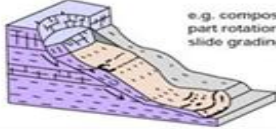
Material	ROCA	DERRUBIOS	TIERRA
Movimiento			
CAIDAS	 Rock fall	 Debris fall Scree Debris cone	 Earth fall Colluvium Debris cone
VUELCOS	 Rock topple	 Debris topple Debris cone	 Earth topple Debris cone
DESPLAZAMIENTOS	Rotational  Single rotational slide (slump) Failure surface	 Multiple rotational slide Crown Scarp Head Scarp Minor Scarp	 Successive rotational slides
	Translational (Planar)  Rock slide	 Debris slide	 Earth slide
EXPANSIONES	 Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Gully Camber slope Dip and fault structure (planed off by erosion) Valley bulge structure Thinning of beds Plane of discontinuities Competent substratum e.g. cambering and valley bulging		 Earth spread
FLUJOS	 Solifluction flows (Periglacial debris flows)	 Debris flow	 Earth flow (mud flow)
COMPLEJOS	 e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		 e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

Tabla 3. Clasificación para los tipos de movimientos gravitacionales según Varnes (1978).
Elaboración propia.

•Desprendimientos (caídas, derrumbes, *falls*): movimientos de ladera muy rápidos de uno o varios fragmentos de roca, derrubios o tierra que se han desprendido de un talud abrupto. Se denomina desprendimiento cuando la caída de estos es una trayectoria no vertical, mientras que cuando la caída es en trayectoria vertical, se le llama colapso.

•Vuelcos (*toppling, topples*): movimientos de rotación hacia el exterior de un escarpe de una masa de roca, derrubios o tierra alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad de la masa desplazada. Son roturas que se desarrollan sobre materiales con estructuras verticales. Existen los desplomes, vuelcos en los que la masa movida cae con un movimiento de giro en su base; los vuelcos por flexión, donde la masa cae por flexión, habitual en materiales muy estratificados y, cabeceos, también habituales en las zonas superficiales de las laderas compuestas por materiales con una marcada estratificación,

existiendo una flexión del material y un posterior deslizamiento de esos materiales que ya se han flexionado.

- Deslizamientos (*landslides, slides*): movimientos de ladera de velocidad variable que afectan a masas de suelo o roca fundamentalmente sobre superficies de rotura o sobre zona con intensa deformación por cizallamiento. Presentan poca deformación en su desplazamiento, que suele ser sobre una o varias superficies. Existen tres tipos de deslizamientos: deslizamientos traslacionales, deslizamientos rotacionales y deslizamientos en bloque.

- Extensiones laterales (*spreading, lateral spreads*): son movimientos a favor en pendientes muy bajas, desplazamientos laterales súbitos en arenas y limos con agua intersticial, con una superficie de cizallamiento basal que no suele estar bien definida. Pueden confundirse con los deslizamientos traslacionales asociados a procesos de flujo.

- Flujos (*flows*): movimientos de velocidad variable que afectan a materiales con poca cohesión como arcillas y rocas muy meteorizadas, fluidificados por aire o agua. Tienen lugar sobre muchas superficies de rotura poco definidas y una gran deformación interna, debido a su gran contenido en agua que hace que se comporte como un fluido, contando con una profundidad escasa y una gran extensión. Existen varios tipos de flujo: reptación (superficial, continua o terracitas); soliflucción; flujos de tierra; flujos de derrubio y Lahares.

Realizadas todas estas definiciones, es importante recalcar que, en Canarias, y en concreto La Palma, los movimientos de ladera más frecuentes son los desprendimientos (Martín Raya *et al.*, 2023a) y aunque afectan a zonas muy localizadas pueden ser peligrosos cuando afectan a zonas habitadas y carreteras al poner en peligro a personas y bienes (Melillo *et al.*, 2020). Por esta razón, el presente trabajo se centrará en estos movimientos de ladera, dejando a un lado los grandes deslizamientos, menos frecuentes en las islas.

4.2 Métodos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera

El análisis y la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera es un aspecto fundamental para la prevención y mitigación de riesgos asociados a este tipo de fenómenos naturales (Martín Raya *et al.*, 2023a). Existen diferentes métodos para llevar a cabo un análisis de susceptibilidad, pero es muy importante que pueda representar fielmente la correlación entre un conjunto de factores geográficos como son, entre otros, la pendiente, litología, precipitaciones y vegetación (Lomoschitz *et al.*, 2002; López-Díez

et al., 2015; Goumrasa *et al.*, 2021). En este sentido, la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera es un proceso complejo que requiere la combinación de diferentes métodos por lo que la elección del adecuado dependerá de las características específicas de la zona de estudio y de los recursos disponibles para llevar a cabo el análisis.

Entre todos los métodos existentes, se pueden definir de manera clara dos para llevar a cabo el análisis de la susceptibilidad (Irigaray y Chacón, 2002). En primer lugar, aquellos denominados como métodos deterministas, que se centran en el estudio de los movimientos de ladera basándose en las leyes físicas y mecánicas universales de conservación de masa, energía y equilibrio de las fuerzas, utilizándolos tanto para predicciones temporales como espaciales mediante cálculos de estabilidad en las laderas y taludes para predecir su comportamiento. Este fundamento físico es su principal ventaja. Estos métodos tienen gran aplicación en análisis de taludes individuales y laderas de dimensiones reducidas, donde el conocimiento de la superficie debe ser extenso, pero, sin embargo, son métodos costosos, lentos y poco aplicables a escalas generales, dada su “rigidez” a la hora del análisis (Hammond *et al.*, 1992 y Terlien, 1996). En segundo lugar, los métodos no deterministas son ideales para estudios centrados en el análisis del nivel de susceptibilidad a pequeña y mediana escala. En ellos se utiliza información a partir de las observaciones geológicas y geomorfológicas, además de la que ofrecen modelos basados en el tratamiento estadístico de los parámetros empíricos de las laderas, como lo son los geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y morfométricos. El estudio de los procesos pasados y su origen permiten hacer predicciones considerablemente precisas de qué procesos van a acontecer en el futuro. Este concepto viene basado en el principio de actualismo (Hutton, 1776), muy presente en estos métodos no deterministas. Estos modelos se apoyan fuertemente en los SIG, lo que les da una ventaja en cuanto a facilidad, rapidez y economía frente a los métodos deterministas (Irigaray y Chacón, 2002).

Otra forma de diferenciar las metodologías existentes en cuanto a análisis de susceptibilidad pasa por diferenciar las técnicas utilizadas en el proceso, como por ejemplo SIG, teledetección, trabajo de campo o datos proxy. Los principales métodos y técnicas utilizadas para la zonificación de la susceptibilidad frente a los movimientos de ladera mediante la utilización de SIG se pueden englobar en: métodos basados en el análisis de distribución de los movimientos de ladera; modelos basados en el análisis geomorfológico; modelos basados en el análisis cualitativo; modelos basados en análisis

estadísticos bivariantes (El Hamdouni, 2001 y Luque Poma, 2010); modelos basados en el análisis estadístico multivariante (Irigaray y Chacón, 2002; Azañón *et al.*, 2008; (Perálvarez, 2021). Por su parte, los modelos basados en el análisis de distribución de los movimientos de ladera, centrados en la teledetección y fotointerpretación, el trabajo de campo y los registros históricos del área de estudio (Rodríguez Ortiz *et al.*, 1978 y Barra *et al.*, 2021), tienen como resultado un mapa inventario en el que se representa la distribución de los movimientos de ladera en el terreno. Es un método apropiado para escalas medias y grandes, dado su nivel de detalle; no obstante, cabe destacar que estos métodos también se acaban apoyando en SIG para procesar e interpretar los resultados. Este tipo de métodos permite interpretar varios momentos, pudiendo así estudiar las variaciones que existen e identificar y analizar puntos o sectores relacionados con movimientos reactivados, estabilizados o de nueva generación (Delgado *et al.*, 2004 y Perálvarez, 2012). Con este método se logra un alto nivel de detalle, a escalas medianas y grandes que permite en último término llevar a cabo acciones para reducir el riesgo. No obstante, la cantidad de tiempo que requiere el estudio dinámico temporal de la ocurrencia de movimientos de ladera hace que no siempre sea la mejor opción.

Aunque normalmente se presenten por separado, la combinación de métodos y técnicas de análisis puede mejorar el nivel de precisión y detalle del modelo a desarrollar. En este sentido, los modelos de inventario y densidad de movimientos funcionan eficazmente para determinar la influencia de cada parámetro de manera individual de cara a realizar un análisis multivariante.

Los modelos basados en el análisis geomorfológico determinan la susceptibilidad de una ladera a movimientos, centrándose en la cartografía del inventario de movimientos en el contexto geomorfológico. Son métodos que dependen mucho de la experiencia del investigador, ya que tienen un gran punto de subjetividad. Este modelo sirve para escala pequeña, media o grande. La utilización de los SIG en este modelo se centran más en herramientas de dibujo y digitalización que en una herramienta de análisis de factores.

Los modelos basados en el análisis estadístico bivalente incorporan un mayor grado de objetividad, desarrollando técnicas estadísticas que ayuden a la evaluación de la susceptibilidad. Se basa en un análisis cruzado de factores utilizados y el cálculo de densidad de movimientos, usando valores normalizados ponderados según el investigador, para elaborar mapas de susceptibilidad. La escala media es ideal para este

tipo de modelo en el que los SIG constituyen una herramienta muy adecuada. Existen diferentes variedades dentro de este modelo: el método de la matriz (Irigaray, 1995), un método cuantitativo para establecer un índice de inestabilidad en una determinada zona; el método de “valor de información” (Irigaray, 1995), una técnica estadística que requiere una base de datos de factores, obtenidos para diferentes unidades de terreno; el método de “indexación” (Rogers & Sitar, 1994), basado en el índice de frecuencia normalizado, dándole una importancia relativa y reclasificándolo, y, el método de “ponderación de evidencias”, que considera fenómenos puntuales de movimientos de ladera junto con diferentes factores del terreno (Bonham-Carter, 1989).

Los modelos deterministas predicen el comportamiento de la generación de movimientos de ladera, estudiando cuál es la contribución relativa de cada uno a la susceptibilidad total de una unidad de terreno (Azañon *et al.*, 2008 y Perálvarez, 2021). El análisis estadístico puede estar enfocado de dos maneras, en la comprobación de una lista de factores determinantes en la generación de movimientos individuales (Carrara *et al.*, 1977) y, enfocado sobre las unidades del terreno pertenecientes al área de estudio, recogiendo datos geomorfológicos, hidrológicos y morfométricos de las unidades y analizándolas mediante técnicas de regresión múltiple o análisis discriminante (Carrara *et al.*, 1991). El nivel de detalle de estudio hace que cambien el número de variables de entrada, aunque los más importantes suelen ser los de geomorfología, pendiente, geología, uso del suelo, la distancia a fallas, red de drenaje y el inventario de movimientos de ladera (Thiery *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2021; Panchal & Shrivastava, 2022). Es un método aplicable tanto a escalas pequeñas, como a medianas o grandes. Mediante programas estadísticos y SIG, se genera un mapa de susceptibilidad que represente la ausencia o presencia de susceptibilidad de ocurrencia de movimientos de ladera dentro del área de estudio.

Presentados y explicados los diferentes modelos metodológicos para el análisis de la susceptibilidad a movimientos de ladera, se puede afirmar que la metodología utilizada en este trabajo se trata de un análisis multivariante dentro de los enfoques no deterministas, debido a que se analiza la susceptibilidad mediante la unión de variables ponderadas, asignando un valor a cada uno de los factores geográficos antes nombrados (pendiente, litología, precipitaciones y vegetación) (López-Díez *et al.*, 2015). Este proceso de análisis cuantitativo multicriterio (Barredo Cano & Gómez Delgado, 2006) será el que determine empíricamente los valores de cada factor. Esta metodología se encuentra sustentada, tal y como se demostrará en apartados posteriores, en el estudio de

otros autores, que han demostrado que existe un orden en cuanto a importancia de estas variables.

5. ÁMBITO DE ESTUDIO

La isla de La Palma se integra dentro de la parte occidental del archipiélago canario, perteneciente a la región macaronésica y localizado en el océano Atlántico, a unos 100 km de la costa noroeste del continente africano (Figura 3).

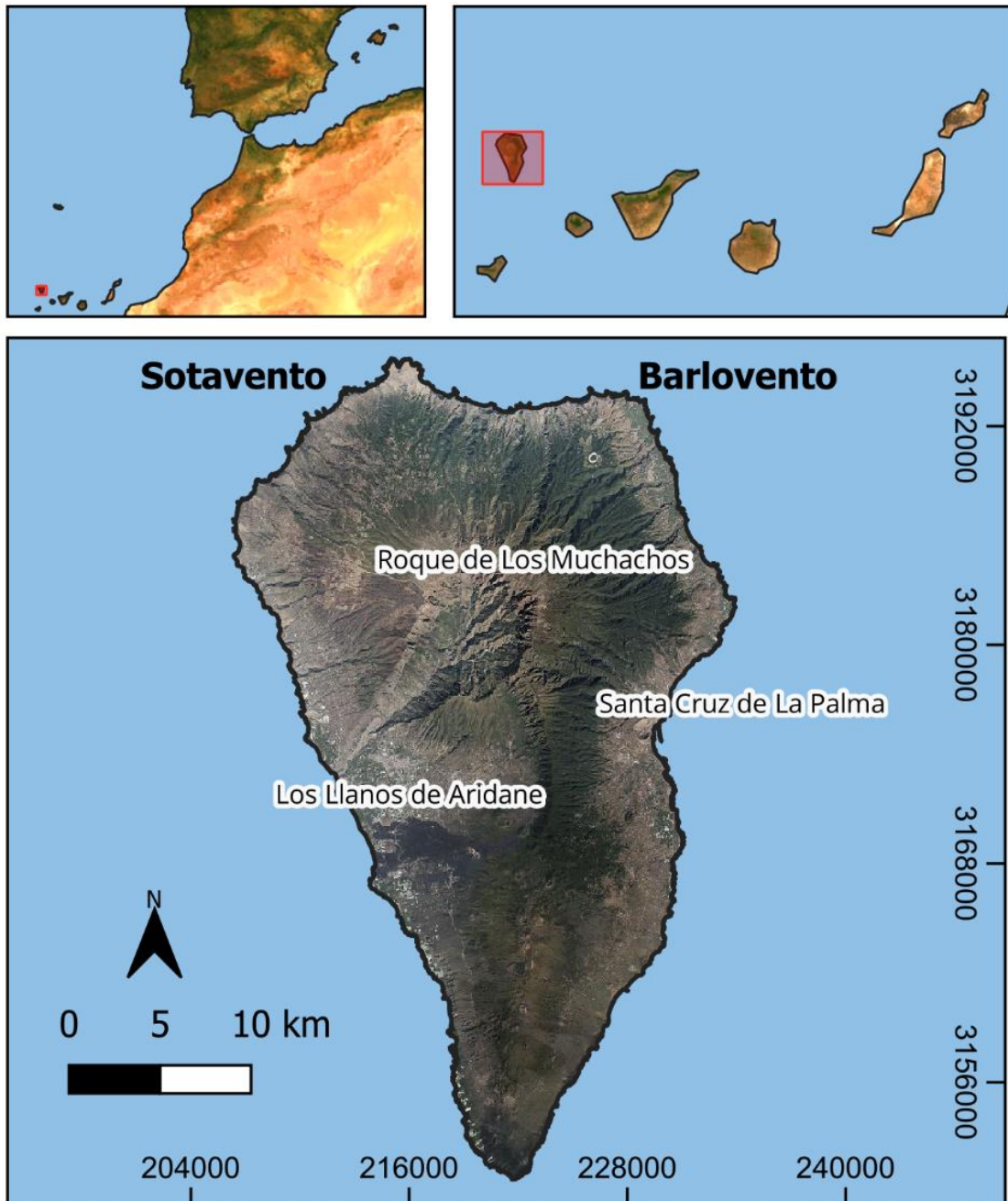


Figura 3. Delimitación de la zona de estudio. Ortofotografía PNOA e IDECANARIAS (2023). Elaboración propia.

La Palma es la quinta isla en tamaño (706 km²) y en población (83.875 habitantes) (INE, 2023) y la segunda en altitud, siendo su punto más alto el Roque de Los Muchachos (2.426 m.s.n.m.) y dejando importantes pendientes en toda su extensión. El origen de la isla, al igual que el de toda Canarias, es volcánico, y se estima que tiene una edad geológica de unos 2 millones de años, siendo de las más jóvenes del Archipiélago.

A nivel demográfico, La Palma cuenta con 83.875 habitantes, lo que es el 3,8 % de la población total de Canarias y se divide en 14 municipios, situándose la capital en el municipio de Santa Cruz de La Palma. La concentración de la población se sitúa en los municipios de Los Llanos de Aridane (20.551) y Santa Cruz de La Palma (15.361) (ISTAC, 2022), albergando el 43% de la población total de la isla.

5.1 Contexto climático y biogeográfico

El clima de La Palma, enmarcado dentro del clima subtropical existente en Canarias, viene caracterizado y condicionado, principalmente, por tres factores climáticos: la latitud, el Anticiclón de las Azores y la corriente fría de Canarias (Ferraz & Ezpeleta, 2022). La isla, al situarse dentro del Archipiélago Canario, se encuentra en un área de transición entre el mundo templado y el tropical, por su emplazamiento latitudinal, a 28° Norte (Marzol & Máyer, 2012). Asimismo, relacionado con su localización en el Atlántico Oriental subtropical, la isla se ve afectada por la influencia atmosférica del Anticiclón de las Azores, produciendo estabilidad (condición de vientos alisios) o inestabilidad que permitiría la llegada de borrascas, intrusiones de polvo sahariano o perturbaciones tropicales dependiendo de su posición (Marzol, 1988 y Dorta, 1999). Por último, la influencia en el clima del Archipiélago de la corriente fría de Canarias es trascendental, puesto que esta transporta aguas de latitudes más septentrionales, provocando que la temperatura de la superficie del mar sea bastante más baja que lo que debería si nos limitamos exclusivamente a la latitud (Font Tullot, 1959).

Por otro lado, dentro de la propia isla se producen variaciones en las condiciones climáticas debido a la influencia de otros factores, relacionados con las características físicas de La Palma, y presentándose como principal condicionante el relieve. Este se caracteriza por ser muy accidentado, existiendo grandes desniveles por toda la isla, así como una gran cantidad de barrancos, especialmente en el sector norte. La disposición de este relieve hace que existan dos vertientes climáticas diferenciadas (Ferraz & Ezpeleta,

2022). La vertiente de barlovento se caracteriza por la afección directa de una capa de aire húmedo detraída por los vientos alisios, mientras que la vertiente de sotavento queda resguardada de esta humedad y solo es afectada esporádicamente, al producirse el efecto Föhn (Figura 4) (Font Tullot, 2000 y Marzol, 2001). En relación con las situaciones de inestabilidad atmosférica, las advecciones saharianas son generalizadas en toda la isla, aunque ligeramente centradas en la vertiente norte, mientras que las borrascas inciden de mayor a menor forma en la vertiente norte y sur. Estas últimas son las principales causantes de precipitación en la isla. Las precipitaciones varían según la altura y orientación, y, según el Plan Hidrológico Insular, se alcanzan los valores máximos (1100 mm/año) en el sector noreste (Barlovento y San Andrés y Sauces) y mínimos (300-400 mm/año) en el suroeste de la isla (Los Llanos de Aridane), siendo el promedio insular de 740 mm/año. La correlación directa que existe entre altitud y precipitación se ve alterada por una discontinuidad, a partir de los 1500 metros donde descienden bruscamente las precipitaciones (Marzol, 1987).



Figura 4. *Fotografía del efecto Föhn en la cumbre de La Palma desde El Llano El Jable. Fuente Propia.*

Desde el punto de vista biogeográfico, La Palma pertenece a la región macaronésica. Las comunidades vegetales se distribuyen en cinco grandes pisos bioclimáticos (Figura 5): (1) cardonal-tabaibal, hasta los 300 m en barlovento y hasta los 400 en sotavento; (2) bosque termófilo justo encima del cardonal-tabaibal; (3) monteverde, compuesto por

fayal-brezal y laurisilva, entre los 350 y 1500 en las laderas de barlovento; (4) formaciones de pinar, principalmente *Pinnus Canariensis*, por encima de la laurisilva en vertientes a barlovento y sustituyéndola en las vertientes a sotavento, y por último, (5) matorral de cumbre compuesto generalmente por retamonar-codesar , a partir de los 2000 metros de altitud, por encima del pinar (Del Arco Aguilar *et al.*, 2010). La isla cuenta con un total de 900 especies vegetales identificadas, de las cuales el 45% son endemismos canarios y macaronésicos, frente al 15% de especies exóticas (Martín Esquivel, 2010). Existe una fuerte relación entre los cultivos y la vegetación natural, ambas relacionadas con las condiciones climáticas locales. Asimismo, en las zonas de costa predomina el cultivo de frutales, como el aguacate y otros frutales, siendo el cultivo de mayor importancia el plátano, por su extensión e importancia socioeconómica. En cambio, las zonas de secano están predominadas por viñedos y almendros, además de cultivos forrajeros (Ferraz & Ezpeleta, 2022).

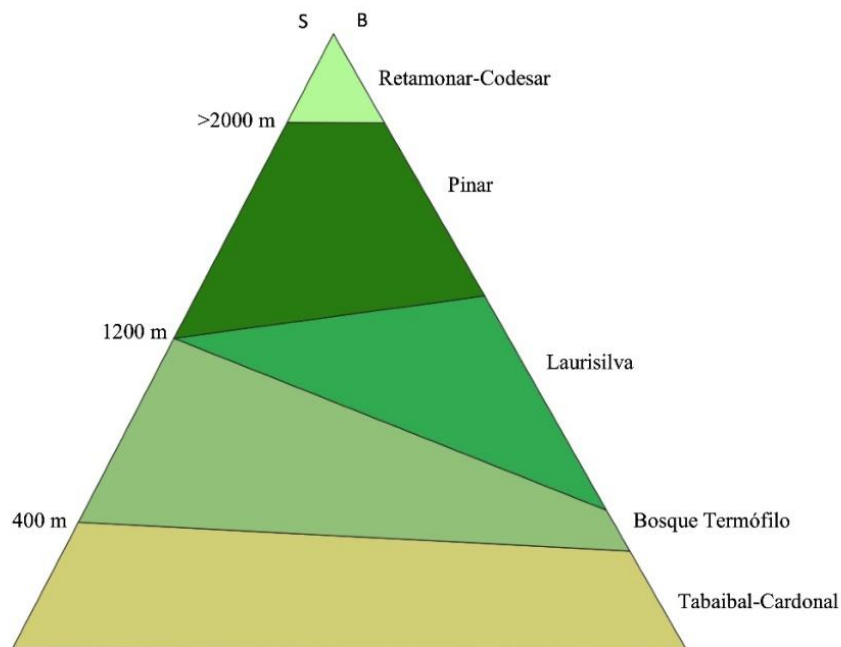


Figura 5. Pirámide de los pisos de vegetación de La Palma. Fuente: Beltrán y Hernández, 2023. Elaboración propia.

5.2 Contexto topográfico y geomorfológico

Hace unos 2 millones de años, producto de diferentes erupciones volcánicas, surgió la isla de La Palma, con formación alargada dirección norte-sur y enclavada en la zona occidental del archipiélago canario. Fruto de esta formación se pueden distinguir dos dominios volcánicos bien diferenciados (Figura 7): el dominio Taburiente, situado en el

sector norte con forma cónica, y que alberga las unidades topográficas de Taburiente-Bejenado, la Caldera de Taburiente y Cumbre Nueva; y el dominio de Cumbre Vieja, rift volcánico con forma alargada y tejado a dos aguas con un eje norte-sur hasta la punta sur de la isla (Figura 6) (IGME, 2015).



Figura 6. Fotografía de las formaciones volcánicas de Taburiente, Bejenado y Cumbre Vieja, desde el Pico de La Cruz. Fuente propia.

El dominio Taburiente es un enorme relieve de forma troncocónica y planta semicircular que se eleva actualmente hasta los 2.426 m (Roque de los Muchachos), con una gran depresión central de origen erosivo: la Caldera de Taburiente. Tiene su origen en la superposición de grandes volcanes centrales (estratovolcanes) cuyos cráteres se han ido sucediendo por reactivación progresiva. Desde que comenzó la emersión de la isla, sucesivas etapas volcánicas subaéreas fueron apilando materiales en la vertical hasta alturas que sobrepasaron los 3.000 m. El resultado de estos procesos constructivos es la forma circular que presenta el dominio, a modo de un enorme volcán único central. Toda la fase subaérea se apoyó discordantemente sobre materiales volcánicos submarinos muy atravesados por diques básicos que constituyen el llamado Complejo Basal (4 millones de años) (Troll *et al.*, 2016).

El ascenso de esta formación superó el nivel del mar y, posteriormente, estuvo instruido por gabros y diques que se interpretan como las cámaras magmáticas y los conductos de emisión de las erupciones posteriores. Las primeras emisiones subaéreas constituyen el

llamado volcán Garaffa (1,77 millones de años), muy oculto por las fases volcánicas posteriores y compuesto por coladas mayoritariamente basálticas, atravesadas por diques básicos verticales-subverticales. Sobre él se edificó el volcán Taburiente, con un tramo inferior potente (1,20 millones de años) de aglomerados y brechas básicos de deslizamiento que cubrieron casi toda la isla emergida. Sobre ella se formó un gran apilamiento de coladas basálticas. Posteriormente se emitió el tramo superior (1,1-0,80 millones de años) de similar composición al anterior y coronado por frecuentes conos estrombolianos también basálticos, algunos de carácter hidromagmáticos. Finalmente se produjo una fase subcreciente (0,80-0,71 millones de años) de conos fonolíticos y tefríticos (Troll *et al.*, 2016).

Al final de la construcción del conjunto Taburiente, la acumulación de material en el flanco sur debió de ser tan grande que, por inestabilidad gravitacional o presión litostática creciente, se produjo un gran colapso conocido como deslizamiento de Aridane. El volumen de material movilizado se ha estimado entre 180-200 km³ y se encuentra en el fondo del mar cubriendo el talud de la isla. La depresión creada la ocupó el volcán Bejenado (1.854 m) emitido hace 0,530 millones de años, que se sustentó sobre los materiales que quedaron al descubierto del sustrato del Complejo Basal. Se emitieron coladas fonolíticas. Bejenado tiene fuertes pendientes, cuyo centro debió situarse más al norte, en el interior de la Caldera (Carracedo *et al.*, 2001). El rápido ensanchamiento erosivo de la caldera y los posibles desprendimientos que sufrió ha desmantelado completamente el flanco norte de este edificio. La potencia máxima sobre el sustrato submarino del Complejo Basal es de unos 600 m en el Pico Bejenado (Troll *et al.*, 2016).

En los laterales de la desembocadura del barranco de Las Angustias hay unos potentes depósitos de arenas y gravas que forman dos grandes paredes. Se extienden aguas arriba hasta la zona de La Viña, y tienen un espesor máximo de unos 300 m. La sedimentación resultante al llegar al borde del mar es lo que en geología se denomina como *fan delta*. En las partes bajas del depósito hay lavas fonolíticas intercaladas, de composición similar a las del edificio Bejenado, lo que hace pensar que ambos eventos fueron, en parte, simultáneos. Todo el dominio Taburiente es, actualmente, volcánicamente inactivo. El vulcanismo migró hacia el sur a través de la fisura eruptiva de la dorsal de Cumbre Nueva, con una altura muy regular en torno a 1.400 m, una longitud de unos 7 km y una forma arqueada, y actualmente se encuentra centrado en Cumbre Vieja.

La importancia de las pendientes en este sector norte es muy grande, ya que cuenta con pendientes de entre el 70% y el 100% de desnivel, puesto que existe gran cantidad de barrancos, profundos y anchos, que muestran la gran actividad erosiva que ha sufrido y sufre el dominio Taburiente, que se encuentra en fase de desmantelamiento y que contrasta fuertemente con la erosión no tan desarrollada que existe en el sector sur de Cumbre Vieja, en fase constructiva.

La dorsal de Cumbre Vieja corresponde a la mitad sur de la isla y está estructurada por un eje eruptivo de dirección norte-sur de 21,5 km de longitud, que alcanza su máxima cota altitudinal en la montaña de La Deseada (1.950 metros). Cumbre Vieja constituye una estructura volcánica activada hace alrededor de 0,123 millones de años. Sobre ella se han producido las ocho erupciones históricas (últimos 500 años) acontecidas en la isla, las tres últimas en el siglo XX y siglo XXI (1949, 1971 y 2021) (Troll *et al.*, 2016 y Hernández, 2022). Está formada principalmente por la concentración de fisuras y aberturas ("rift zone"), que individualizan dos vertientes muy acusadas y diferenciadas por su característico "tejado a dos aguas", oriental y occidental. En todo momento, las coladas de las erupciones más recientes discurrieron por los flancos y alcanzaron la costa la mayoría de las veces, ocupando la rasa marina y fosilizando el acantilado previo que se ve ahora como un paleoacantilado. Los materiales que se emitieron son fundamentalmente coladas básicas alcalinas (basaltos alcalinos, basanitas, traquibasaltos y tefritas) y depósitos piroclásticos de carácter estromboliana. También existe un número importante de domos fonolíticos dispersos sobre el rift, como el de Teneguía que dio nombre a la penúltima erupción ocurrida en la isla. Dada su importante actividad volcánica, la sismicidad actual de la isla está claramente asociada con esta dorsal de Cumbre Vieja (Troll *et al.*, 2016). En cuanto a las pendientes en este sector sur, a diferencia del sector norte, no se supera el 45% de desnivel, ya que los barrancos son casi inexistentes y poco excavados, dado que se encuentran en sus primeras fases de desarrollo (Troll *et al.*, 2016 y IGME, 2016).

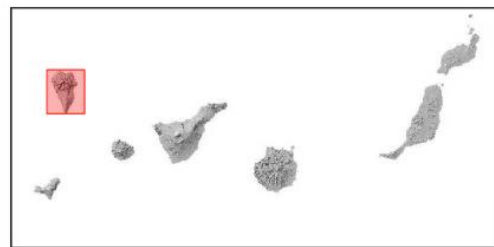
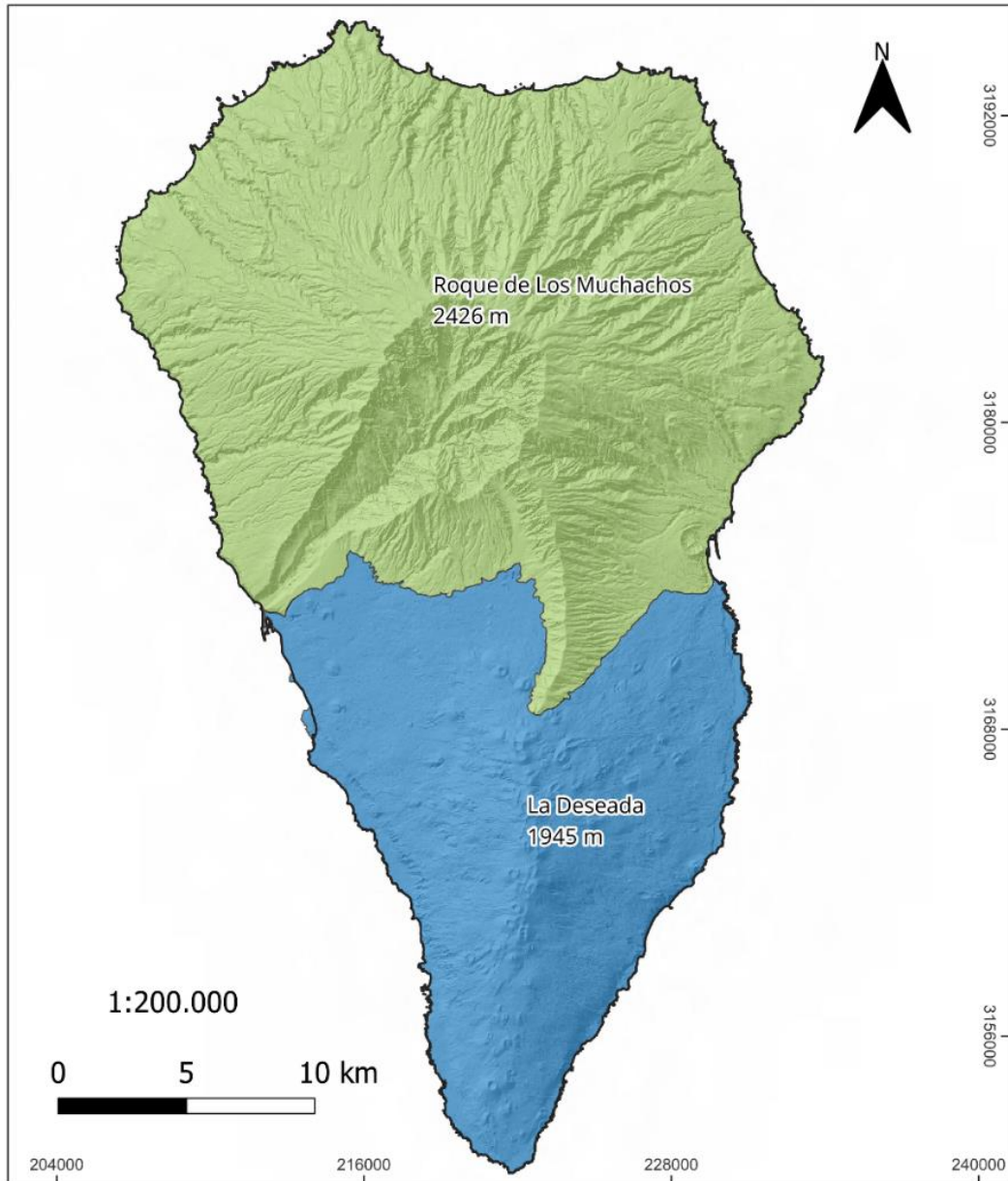


Figura 7. Unidades topográficas de La Isla de La Palma. Fuente: Troll et al., 2016. Elaboración propia.

6. RESULTADOS

Una vez seguida la metodología elegida para realizar este trabajo y tras poner en relevancia el marco teórico y el contexto geográfico, climático, biogeográfico, geomorfológico y topográfico, se procede a analizar y describir los resultados obtenidos.

6.1 Análisis del mapa de susceptibilidad

Para comprender mejor el resultado del análisis de susceptibilidad integrado es necesario comprender cómo se comportan las variables tenidas en cuenta en el proceso.

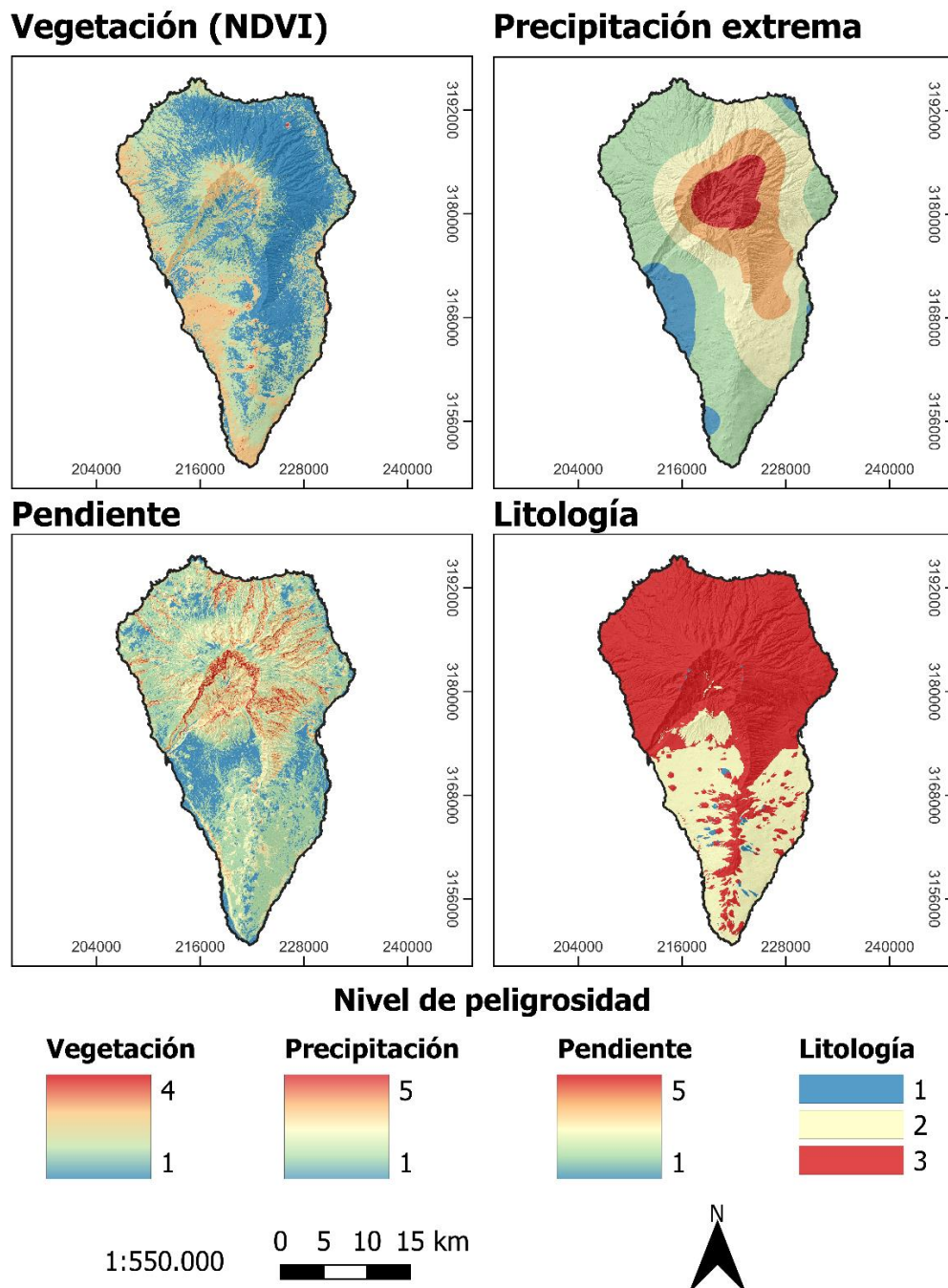


Figura 8. Nivel de peligrosidad de las variables estudiadas. Elaboración propia.

Para ello, las cuatro variables que se han utilizado para calcular la susceptibilidad de movimientos de ladera (vegetación, precipitación extrema, pendiente y litología) se han analizado una a una, describiendo los resultados de los diferentes niveles de susceptibilidad (Figura 8).

Comenzando a analizar la distribución de la vegetación, esta reclasificación ha dado lugar a cuatro niveles de susceptibilidad, los niveles 1 y 2 son los más representativos en La Palma, con un 45,4 % y 36,4 % respectivamente, lo que nos muestra que existe una gran presencia de vegetación en la isla. Los niveles 3 y 4, zonas donde la vegetación representa una menor importancia, solo son un 17,8 y 0,4 % respectivamente. Estos se distribuyen en las zonas de pinar y laurisilva más importantes, muy abundantes sobre todo en el norte y en el noreste de la isla. Asimismo, en las zonas de gran pendiente pertenecientes a la Caldera de Taburiente donde no es posible el desarrollo de grandes masas vegetales y la zona suroeste, lo que corresponde a la expansión urbana de Los Llanos de Aridane y las extensiones de coladas pertenecientes al volcán Tajogaite, es donde está más presente el nivel 3, estando representado de forma anecdótica el nivel 4 en alguna zona del sector de Cumbre vieja.

En cuanto a la precipitación extrema, es el nivel 2 el más abundante, con un 41,5 %. Los niveles 3 y 4 le siguen en importancia con un 27,5 % y 17,4 % respectivamente. El nivel 1 y el 5 son los menos representativos con un 6,1 % y un 7,5 %. Los niveles de peligrosidad según la variable de precipitación extrema se distribuyen de tal forma en la isla que el nivel 5 se encuentra los altos de la Caldera de Taburiente. A partir de ahí, los niveles de peligrosidad van disminuyendo a medida que nos alejamos del centro de la isla, debido al descenso altitudinal principalmente, y se concentran un poco más en el noreste los niveles 5, 4 y 3, predominando en la parte oeste el nivel 1 y 2.

Por su parte, los porcentajes resultantes del histograma realizado dictaminan que el nivel de peligrosidad por pendiente más representado es el nivel 2, con un 41,8 %, seguido del 3 y el 1, con un 27,1 % y 16,5 % respectivamente, siendo los de menor relevancia los niveles 4 y 5, con 11,6 % y un 2,7 %. Los niveles de peligrosidad más alta se concentran en las zonas de mayor pendiente dentro de la Caldera de Taburiente y en varios de los barrancos existentes en el sector norte de la isla. En el Valle de Aridane es donde predomina el nivel 1 de peligrosidad, además de algunas zonas aisladas en el norte. Los

otros dos niveles restantes, el 2 y el 3, niveles de peligrosidad media-baja, se encuentran repartidos por el resto de la isla representando el 68,9 % de la superficie insular.

Por su parte, en la litología existe una clara predominancia del nivel 3 con un 69,7%. Seguido, muy de lejos, por el nivel 2, con un 29,6 %, mucho menos relevante y el nivel 1, casi anecdótico, con un 0,7 %. El primero se observa principalmente en el sector norte, ocupando la Caldera de Taburiente y casi completamente el dominio Taburiente, existiendo también este nivel en la dorsal de Cumbre Vieja, en zonas con materiales piroclásticos sueltos. El nivel 2 aparece en el sector sur de la isla, asociado a las coladas basálticas con piroclastos subordinados pertenecientes a las erupciones relacionadas con la dorsal. Son anecdóticas las zonas en las que aparece el nivel 1, debido a la presencia de conos y macizos sálicos.

Con la consecución de los tres pasos realizados en la metodología para calcular la susceptibilidad de movimientos de ladera se llega a la obtención del mapa final de susceptibilidad (Figura 9), que ha sido reclasificado en 5 clases para definir el grado de peligrosidad al que está sometido el territorio, tal y como se suele hacer en la elaboración de mapas de peligrosidad con esta y otras amenazas de origen natural (Tehrany *et al.*, 2014; Jaari *et al.*, 2014; Rahmati *et al.*, 2016; Martín Raya *et al.*, 2023b). Obteniendo el porcentaje representativo de cada uno de ellos en la isla de La Palma mediante el histograma de la capa ráster resultante se puede proceder a analizar este dato, además de todos los demás resultantes. La obtención del histograma del mapa final de susceptibilidad, reclasificado en 5 grados de peligrosidad, da los siguientes resultados en cuanto a porcentaje representativo: muy baja (3,8%); baja (29,2 %); media (42,5 %); alta (20,3 %) y muy alta (4,2%).

En la isla el nivel de peligrosidad media, que representa un 42,5%, es el predominante, distribuido por casi toda la isla, siendo más importante en el sector norte de la isla. Existe una división norte-sur clara en cuanto a los niveles más altos y más bajos. En la mitad norte de La Palma es donde representa la gran mayoría de las zonas con peligrosidad alta y muy alta, que representan un 20,3 % y un 4,2 % respectivamente del total de la isla. Es en la Caldera de Taburiente principalmente y en las zonas de barrancos del norte, noreste y alguno del noroeste donde estos niveles de peligrosidad se extienden, debido, principalmente, a los sectores de grandes pendientes existentes en estas zonas. Los niveles más bajos de peligrosidad se extienden en su mayoría en el sector sur, siendo el Valle de

Aridane la zona más representativa de estos niveles de peligrosidad, y donde encontramos la mayor acumulación de nivel muy bajo. Existen zonas puntuales, en sectores de costa en los que existen islas bajas, de nivel bajo de peligrosidad en el sector norte, pero representan mucho menos que en el sector sur. La zona de peligrosidad baja abarca un 29,2 % y la de muy baja comprende un 3,8 % del total de la isla.

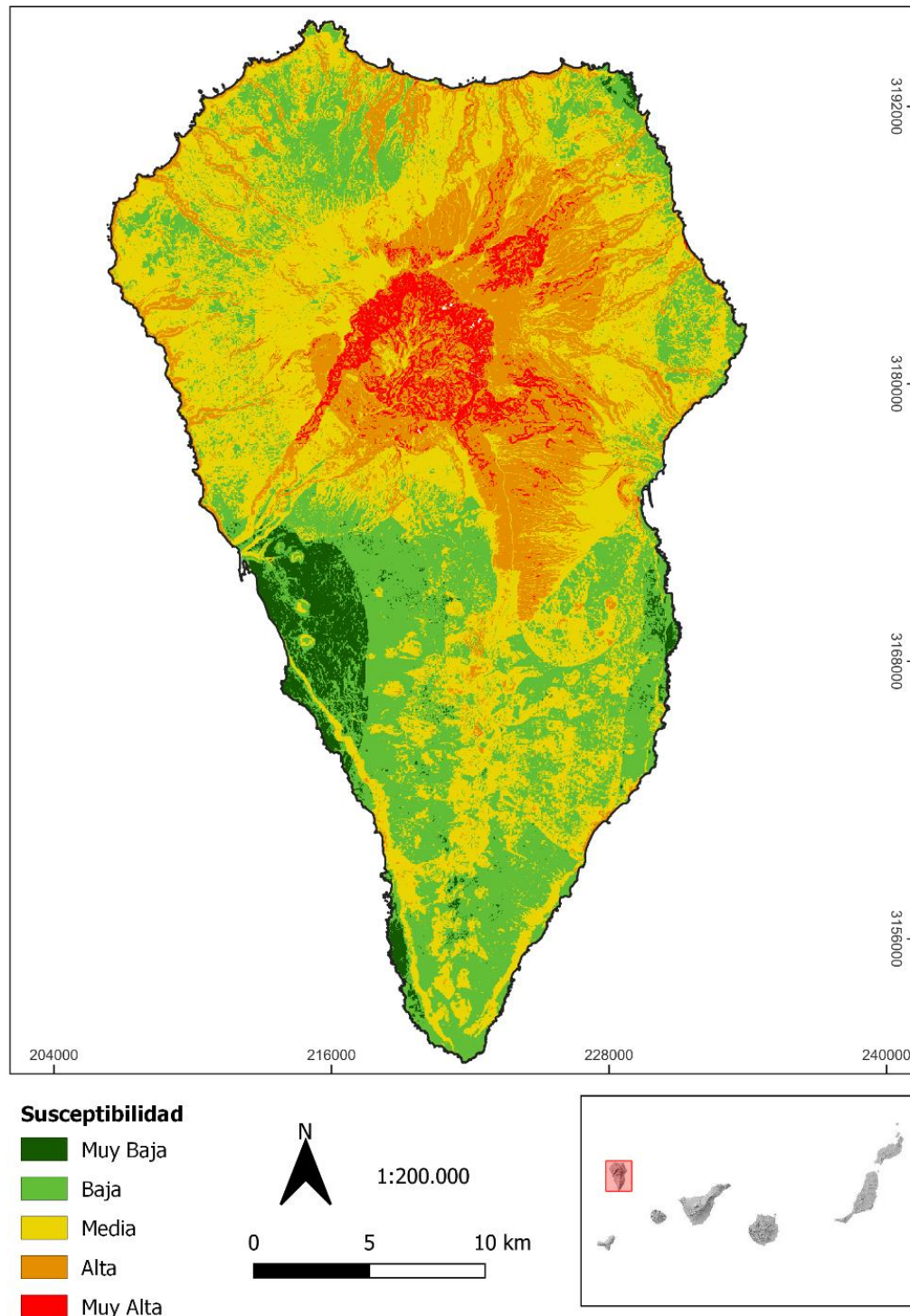


Figura 9. Mapa de Susceptibilidad frente a movimientos de ladera. Isla de La Palma (Canarias). Elaboración propia.

6.2 Análisis de la susceptibilidad por municipios

Los resultados obtenidos con la realización del mapa de susceptibilidad frente a movimientos de ladera podemos utilizarlo para hacer un análisis más en profundidad. Estudiando la susceptibilidad a nivel municipal, se pretende determinar cuáles son los municipios de la isla de La Palma que albergan en su territorio un mayor nivel de peligrosidad.

Para analizar de forma eficiente el nivel de susceptibilidad en cada municipio, se ha hecho una división en 5 niveles: muy baja, baja, media, alta y muy alta (Tabla 4).

Municipio	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Barlovento	1,1 %	14 %	45,7 %	36,8 %	2,4 %
Breña Alta	0 %	14,6 %	45,8 %	38,5 %	1%
Breña Baja	2,7 %	52,7 %	42,2 %	2,4 %	0 %
El Paso	0,8 %	32,7 %	29,2%	23,2 %	14,1 %
Fuencaliente	3,9 %	60,8 %	34,8 %	0,5%	0 %
Garaffa	0%	26,2 %	55,4 %	17,6 %	0,8 %
Los Llanos de Aridane	42,6 %	45,3 %	11,6 %	0,6 %	0 %
Puntagorda	0 %	21,7 %	66,7 %	11,5 %	0,2 %
Puntallana	0 %	22,8 %	52,7 %	24,2 %	0,3%
San Andrés y Sauces	0 %	7 %	32,7 %	50,3 %	10,1 %
Santa Cruz de La Palma	0 %	4,7 %	36,1%	50,1 %	9,2 %
Tazacorte	53,8 %	32,1 %	13,8 %	0,3 %	0 %
Tijarafe	0,1 %	13 %	70,4 %	16,2 %	0,2 %
Villa de Mazo	1,8 %	51,4 %	45,5 %	1,3 %	0 %

Tabla 4. Susceptibilidad por municipios. Elaboración propia.

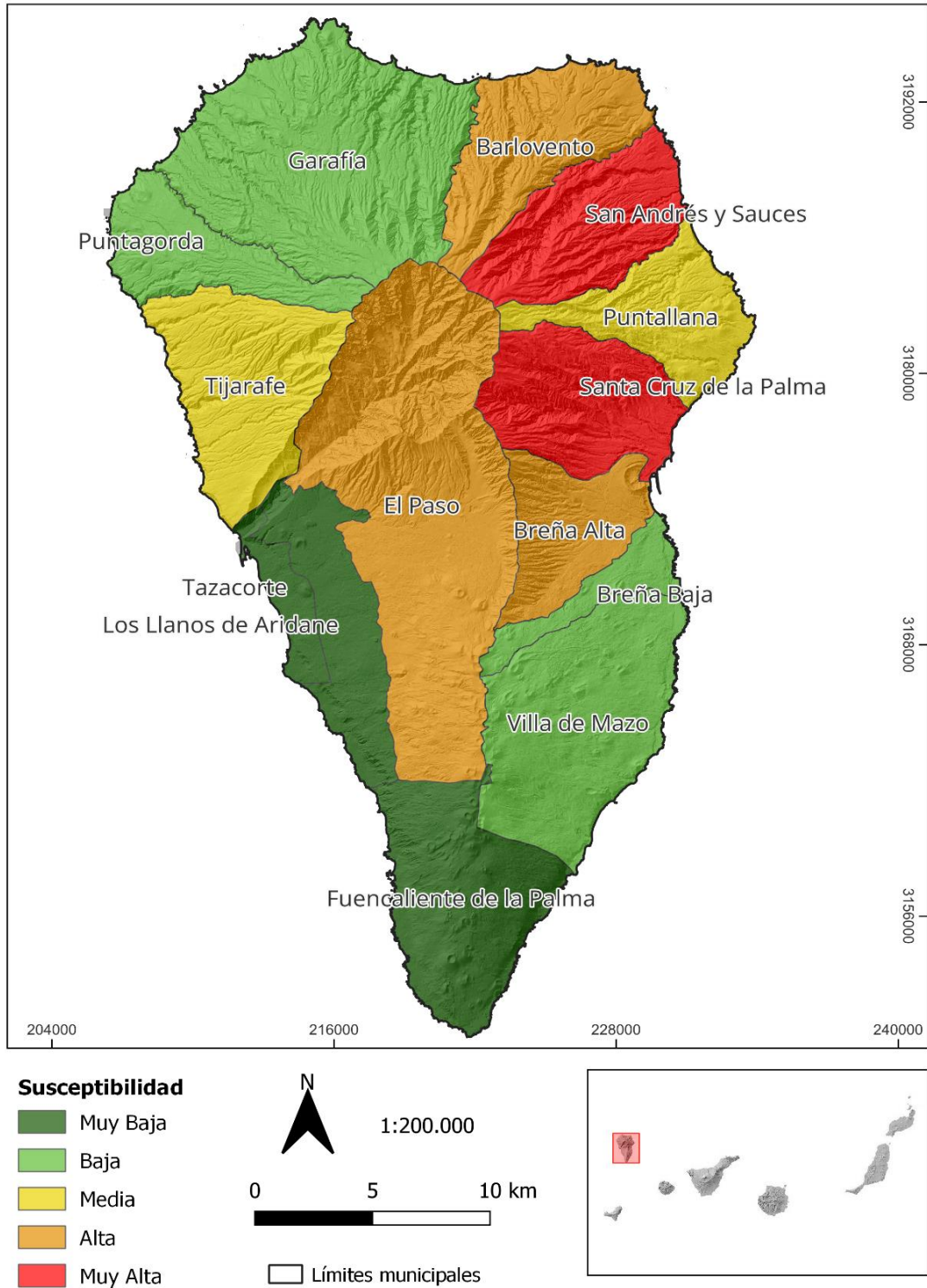


Figura 10. Mapa de Susceptibilidad media frente a movimientos de ladera por municipios. Isla de La Palma (Canarias). Elaboración propia.

En primer lugar, resulta lo más importante analizar cuáles son los municipios de La Palma con mayor susceptibilidad de movimientos de ladera y, del mismo modo, mayor nivel de peligrosidad. Nos hemos centrado en los niveles de susceptibilidad “Alta” y “Muy Alta”

determinados en el mapa de susceptibilidad que comprenden un 20,3 % y un 4,2 % respectivamente, lo que es en su conjunto un 24,5 % del total de la isla.

Los municipios con mayor porcentaje (más del 50%) de niveles altos-muy altos, y los que podríamos decir que son los municipios con mayor susceptibilidad a movimientos de ladera son Santa Cruz de La Palma y San Andrés y Sauces, con un 50,3 % y 50,1 % respectivamente en nivel alto de susceptibilidad y con un 9,2 % y 10,1 % respectivamente en nivel muy alto. El municipio que alberga mayor representación del nivel muy alto es El Paso con un 14,1 %, debido a que en su territorio se encuentra la Caldera de Taburiente (Tabla 4). La distribución de porcentajes dentro de estos municipios es bastante similar. En Santa Cruz de la Palma, a los ya mencionados 50,3 % en el nivel alto y el 9,2 % en muy alto de susceptibilidad, le sigue el nivel medio que representa un 36,1 % y de peligrosidad baja un 4,7 %. En San Andrés y Sauces, el nivel medio representa un 32,7 % y el nivel bajo un 7 %. La presencia de grandes barrancos con fuertes pendientes en ambos municipios, además del Risco de La Concepción en Santa Cruz de La Palma, explica que sean municipios con alta susceptibilidad a movimientos de ladera.

El nivel de susceptibilidad media es el que más porcentaje representa en el mapa de susceptibilidad de La Palma (42,5%), así que es importante analizar su distribución en los distintos municipios de la isla. Teniendo en cuenta, como hemos dicho, que es el nivel de susceptibilidad predominante en la isla, casi todos los municipios tienen un porcentaje bastante representativo de este nivel, aun así, existen diferencias notables entre ellos. Tijarafe (70,4 %) y Puntagorda (66,7 %) son los municipios en los que destacan más este nivel, ambos con valores por encima del 65 %. Existe otro grupo de municipios en los que este nivel tiene una representación bastante notable, por encima del 45 %: Garafía (55,4 %); Puntallana (52,7%); Breña Alta (45,8%); Barlovento (45,7 %) y Villa de Mazo (45,5%) (Tabla 4). Es importante destacar que dentro de estos 5 municipios en los que el nivel medio tiene mayor importancia, hay diferencias entre ellos en cuanto a cuál es el nivel de peligrosidad que sigue en nivel de importancia, el alto o el bajo, lo cual puede determinar si el municipio tiene mayor o menor susceptibilidad. Los casos en los que el nivel de peligrosidad más importante después del medio es el alto son Barlovento (36,8%); Breña Alta (38,5 %) y Puntallana (24,2 %). Villa de Mazo y Garafía son los municipios en los que el nivel de peligrosidad bajo es el segundo más importante, con un 51,4 % y un 26,2 % respectivamente. Estas diferencias en el nivel medio de peligrosidad

vienen fundamentalmente determinadas por las diferentes variables que hemos tenido en cuenta en el análisis de susceptibilidad.

Los niveles de susceptibilidad baja (29,2 %) y muy baja (3,8 %) comprenden un total del 33 % de La Palma, existiendo amplias diferencias en su representatividad dentro cada uno de los municipios. Tazacorte y Los Llanos de Aridane son, sin lugar a duda, los municipios en los que el nivel de susceptibilidad muy baja tiene mayor importancia, contando con una representación de este nivel del 53,8 % y del 42,6 % respectivamente, y complementada esta baja susceptibilidad con significativos porcentajes en el nivel bajo, 32,1 % en el caso de Tazacorte y 45,3 % en el caso de Los Llanos de Aridane (Tabla 4). Además de estos dos municipios en los que domina la susceptibilidad muy baja, se encuentra el municipio de Fuencaliente, que aunque no cuenta con un gran porcentaje en susceptibilidad muy baja (3,9 %), tiene una gran representación en su territorio del nivel bajo (60,8 %). La distribución de los niveles de peligrosidad en estos tres municipios son: primero en Tazacorte, como hemos dicho, 53,8 % el nivel muy bajo y un 32,3 % el nivel bajo, seguido por un nivel medio que representa el 13,8 % y por último un 0,3 % el nivel alto. En Los Llanos de Aridane el nivel muy bajo representa un 42,6 %, el nivel bajo un 45,3 %, el nivel medio un 11,6 % y el nivel alto un 0,6 %. En cuanto al municipio de Fuencaliente, al nivel bajo con un 60,8 % le sigue el nivel medio con un 34,8 %, representando el nivel muy bajo y el nivel alto un 3,9 % y un 0,5 % respectivamente. La predominancia clara del nivel bajo y muy bajo de susceptibilidad se debe principalmente a que estos tres municipios se encuentran en zonas principalmente llanas, jóvenes geológicamente hablando y con poca erosión, en las que predomina la presencia de islas bajas, existiendo algunas zonas en las que la susceptibilidad es mayor, pero en general el nivel de peligrosidad es bajo o muy bajo.

Como hemos visto al analizar los porcentajes, existen grandes diferencias entre municipios a la hora de valorar su susceptibilidad frente a movimientos de ladera y esas diferencias se basan en las variables que hemos tomado de referencia para hacer nuestro estudio de susceptibilidad.

Al realizar un mapa en el que se representa la susceptibilidad media de cada municipio frente a movimientos de ladera (Figura 10), observamos que, aunque podríamos decir por los resultados obtenidos en el mapa de susceptibilidad general (Figura 9) que la peligrosidad media de La Palma es la de nivel medio, las susceptibilidades medias por

municipios son bastante diferentes entre sí. Los municipios que presentan el mayor nivel de susceptibilidad son Santa Cruz de La Palma y San Andrés y Sauces. El nivel alto de susceptibilidad se ve representado en 3 municipios, los cuales son Barlovento, Breña Alta y El Paso. Curiosamente, solo dos municipios se encuentran con un nivel de susceptibilidad medio, Puntallana y Tijarafe. En cuanto al nivel bajo, encontramos 4 municipios: Puntagorda, Garafía, Breña Baja y Villa de Mazo. Por último, los tres municipios con un nivel muy bajo de susceptibilidad son Los Llanos de Aridane, Tazacorte y Fuencaliente. Observando este mapa de forma general, salta a la vista que la zona de la isla con mayor susceptibilidad es el sector este y noreste, donde la susceptibilidad media oscila entre los niveles de susceptibilidad media a muy alta. En contraposición, en el sector suroeste de La Palma es donde encontramos los niveles municipales de susceptibilidad más bajos, siendo el dominador de esta zona la susceptibilidad muy baja.

6.3 Análisis de la prensa y eventos acontecidos

Haciendo una búsqueda exhaustiva en numerosos artículos en la prensa relacionados con desprendimientos y derrumbes en La Palma, se encuentra fácilmente sucesos que han afectado a lo largo de los años de forma importante a la población en mayor o menor medida.

El inventario de eventos de movimiento de ladera recogidos en la prensa (Figura 11), nos muestran que los resultados obtenidos con el mapa de susceptibilidad concuerdan con la realidad, ya que la mayoría de estos eventos se localizan en sectores con susceptibilidad alta o muy alta frente a movimientos de ladera. Es de vital importancia tener en cuenta el punto concreto donde sucede cada evento de movimiento de ladera acontecido, ya que, aunque el mapa de susceptibilidad frente a movimientos de ladera por municipio (Figura 10) nos ofrezca una idea general de cuáles son los municipios de la isla más susceptibles, es en el mapa principal (Figura 9) donde podemos ver cuál es el nivel concreto de susceptibilidad de los eventos inventariados. Utilizando como principal herramienta de análisis el mapa principal de susceptibilidad (Figura 9), hemos realizado una composición comparativa en el que se localizan los 9 eventos recogidos (Figura 11), los cuales coinciden con celdas en las que el nivel de susceptibilidad vade medio a muy alto, un hecho que ratifica la utilidad y validez al trabajo realizado.

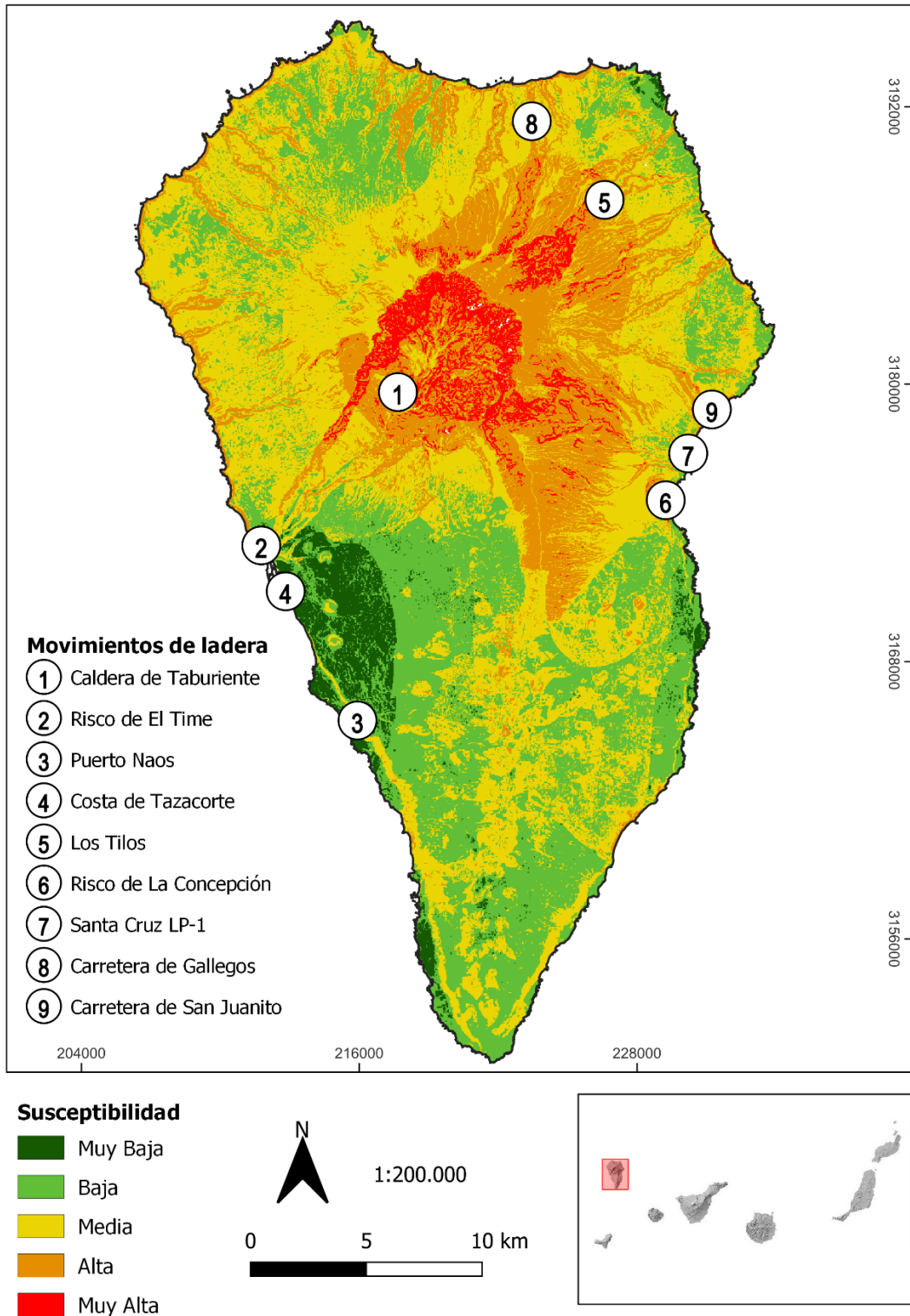


Figura 11. Mapa de eventos de movimiento de ladera recogidos en la prensa. Isla de La Palma (Canarias). Elaboración propia

Punto 1 -) La Caldera de Taburiente, situada en el municipio de El Paso, donde la peligrosidad alta representa un 23,2 % y la muy alta un 14,1 %, es la zona de la isla donde más predominancia tiene el nivel muy alto, y debido a las grandes pendientes que alberga, supone uno de los lugares donde se concentran muchos desprendimientos, en su mayoría pequeños, pero ocasionalmente de impresionantes dimensiones, en los cuales las variables de la pendiente, la precipitación y la vegetación son determinantes (Figura 12).



Figura 12. El Time (2020). *Importante desprendimiento en la Caldera de Taburiente el 23 de Febrero de 2020.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.etime.es/isla-bonita/25620-impresionante-desprendimiento-en-la-caldera-de-taburiente.html>

Punto 2 -) En el Risco de El Time, que marca la división municipal entre Tijarafe y Tazacorte, existen bastantes sectores en los que la susceptibilidad oscila de media a muy alta, favoreciendo la ocurrencia de desprendimientos, dado el gran desnivel que existe en esta zona. El Puerto de Tazacorte, situado a los pies del risco, sufre este peligro recurrentemente, como en el año 2023, en el cual un desprendimiento afectó al puerto viejo (Figura 13).



Figura 13. El Time (2023). *Importante desprendimiento en el risco de El Time el 10 de septiembre de 2023.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.etime.es/la-calle/144-sucesos/45586-impresionante-desprendimiento-en-el-risco-de-el-puerto-de-tazacorte.html>

Puntos 3 y 4 -) En el año 2021, con la erupción del volcán Tajogaite comenzada el 19 de septiembre y la actividad sísmica que precedió a este episodio eruptivo, varios desprendimientos ocurrieron en las semanas anteriores y posteriores a la erupción, en zonas con una susceptibilidad media-alta a movimientos de ladera, como en sectores concretos de Puerto Naos (Figura 14) y de la costa de Tazacorte (Figura 15).



Figura 14. El Time (2021). *Deslizamientos gravitatorios en Puerto Naos producidos por la actividad sísmica el 15 de septiembre de 2021.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.eltiempo.es/la-calle/144-sucesos/35328-deslizamientos-gravitatorios-en-puerto-naos-un-efecto-de-la-actividad-sismica-que-sufre-la-palma.html>



Figura 15. La Provincia (2021). *Desprendimiento en la costa de Tazacorte el 28 de septiembre de 2021, una semana después de la erupción.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.laprovincia.es/sucesos/2021/09/28/desprendimiento-costa-tazacorte-oeste-palma-57710066.html>

Punto 5 -) El municipio de San Andrés y Sauces, como los resultados del mapa de susceptibilidad indican, es uno de los municipios con mayor susceptibilidad a movimientos de ladera, representando el nivel de peligrosidad alta, un 50,1 % y el de peligrosidad muy alta, un 10,1 %. En la carretera de acceso a Los Tilos, uno de los puntos de mayor interés turístico de la isla, en el año 2023 ocurrió un gran desprendimiento en un punto concreto con susceptibilidad muy alta que inhabilitó dicha carretera, haciendo imposible el acceso tanto en vehículo como a pie (Figura 16), suceso propiciado principalmente por la fuerte pendiente presente en los riscos de la zona y por la acción de las lluvias intensas.



Figura 16. La Provincia (2023). *Derrumbe en la carretera de acceso a Los Tilos el 6 de diciembre de 2023.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.laprovincia.es/videos/gran-canaria/2023/12/06/importante-derrumbe-carretera-tilos-moya-95533749.html>

Punto 6 -) En el municipio de Santa Cruz de La Palma, donde el nivel de peligrosidad alta representa un 50,3 % y el de muy alta un 9,2 %, los desprendimientos son habituales, concentrados en la zona del Risco de La Concepción, sector de susceptibilidad alta y muy alta, el cual marca el límite municipal con Breña Alta. A lo largo de los años, el problema de los desprendimientos ha estado presente sobre la carretera que conecta Breña Alta con Santa Cruz de La Palma, los cuales se suelen intensificar en los episodios de fuertes lluvia, como fue el caso en octubre de 2018 (Figura 17). Con el fin de mejorar la seguridad en este tramo, se han tomado medidas, como fue la instalación de mallas que cubrieran la corona del risco, intentando disminuir el número de desprendimientos (Figura 18).



Figura 17. El Día (2018). *Desprendimientos en el Risco de La Concepción por las fuertes lluvias el 29 de octubre de 2018.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.eldia.es/palma/2018-10-29/1-Desprendimientos-Risco-Concepcion-fuertes-lluviAS.htm>



Figura 18. Diario de Avisos (2019). *Una gran malla recubre la corona del Risco de La Concepción.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://diariodeavisos.elespanol.com/2019/03/una-gran-malla-recubre-la-corona-del-risco-de-la-concepcion/>

Punto 7 -) En otras zonas del municipio con susceptibilidad alta, como es la salida norte por la LP-1, han presenciado desprendimientos que han causado problemas en las carreteras, como sucedió a principios del 2023 (Figura 19).



Figura 19. RTVC (2023). *Desprendimiento localizado en la LP-1 salida norte de Santa Cruz de La Palma el 8 de enero de 2023.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://rtvc.es/desprendimiento-en-la-palma/>

Punto 8 -) Otros municipios de la isla ven sus carreteras afectadas por este fenómeno. La vía que conecta Barlovento con Garafía (LP-1, carretera de Gallegos) en la cual existen muchos puntos con susceptibilidad alta de movimiento de ladera, sufría con frecuencia multitud de desprendimientos que ponían en peligro a las personas que circulaban por ella (Figura 20). Esta situación hizo que se tomara la medida de construir una gran malla de seguridad en un tramo de 2,3 km de vía, que mitigara lo máximo posible el gran riesgo que presentaba la inestabilidad de la ladera (Figura 21).



Figura 20. El Time (2015). *Desprendimientos en la carretera entre Barlovento y Garafía el 1 de noviembre de 2015.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://eltime.es/isla-bonita/182-infraestructuras/4504-varios-desprendimientos-bloquean-la-via-entre-barlovento-y-garafia.html>



Figura 21. Canariasahora (2021). *Reapertura de la carretera de Gallegos tras las obras de seguridad de vía.* [Fotografía]. Recuperado de: https://www.eldiario.es/canariasahora/lapalmaaahora/sociedad/cabildo-reabre-carretera-gallegos-concluir-obras-seguridad-via_1_8327875.html

Punto 9 -) También en el municipio de Puntallana, municipio con una susceptibilidad media en el tramo de la LP-1 conocido como “Las curvas de San Juanito”, y con varios sectores concretos de susceptibilidad alta, el 20 de febrero de 2023, el día de la festividad de Los Indianos, hubo un considerable desprendimiento que mantuvo la carretera cortada durante horas, dando lugar a imágenes curiosas de personas vestidas de blanco transitando la carretera para poder llegar a Santa Cruz de La Palma y celebrar la popular fiesta, lo que aumentaba su exposición y el riesgo (Figura 22).



Figura 22. El Día (2023). *Desprendimiento en la carretera LP- 1 dirección Santa Cruz, en las Curvas de San Juanito, Puntallana, el 20 de febrero de 2023.* [Fotografía]. Recuperado de: <https://www.eldia.es/la-palma/2023/02/20/desprendimientos-palma-83290195.html>

7. DISCUSIÓN

Este trabajo, con la excepción de un mapa de susceptibilidad de toda Canarias desarrollado por GRAFCAN con un menor nivel de detalle dentro del proyecto RIESGOMAP en 2013, se presenta como el único estudio de susceptibilidad frente a movimientos de ladera detallado realizado en la isla de La Palma. El trabajo desarrollado que sigue la línea de otros estudios que han realizado mapas de susceptibilidad frente a

movimientos de ladera tanto en España como a nivel global, contribuye a completar los estudios de cálculo de susceptibilidad fundamentados en análisis multivariante (Azañón *et al.*, 2008 y Hemasinghe *et al.*, 2018). Los trabajos que se han hecho en Canarias relacionados con la susceptibilidad frente a movimientos de ladera son escasos, por eso este trabajo se ha apoyado principalmente en el modelo de López-Díez (2015) en su estudio sobre los movimientos de ladera en Canarias, centrado en el caso del Macizo de Anaga, un trabajo que debido a su planteamiento metodológico resulta fácilmente replicable y cuya utilidad y puesta en práctica ha sido comprobada al integrarse en documentos claves para la reducción del riesgo como el Plan de Emergencias Municipal de Santa Cruz de Tenerife.

La isla de La Palma ha sido el territorio en el que hemos desarrollado un estudio general de susceptibilidad frente a movimientos de ladera, al cual se le ha añadido un análisis de esta por municipios, pudiendo determinar cuáles son los más susceptibles a movimientos de ladera, tras comprobar su veracidad gracias a un inventario de eventos relacionados con movimientos de ladera recogidos en la prensa.

La cartografía realizada se presenta como un recurso de gran utilidad para entender de mejor forma cuáles son las áreas que presentan una mayor probabilidad al desencadenamiento de este tipo de procesos de dinámica de vertientes. De la misma manera, la cartografía que se presenta en el trabajo debe entenderse como una excelente fuente para la mejora en la toma de decisiones tanto en el ámbito de la protección civil y gestión de emergencias como también constituyendo un criterio clave para una correcta ordenación del territorio. De esta forma la espacialización de los sectores que presentan mayores niveles de susceptibilidad se configura como un elemento para el desarrollo de medidas preventivas frente a posibles daños causantes por movimientos de ladera en La Palma.

8. CONCLUSIONES

El estudio de la susceptibilidad frente a movimientos de ladera en la isla de La Palma evidencia que varias zonas de la isla presentan importantes problemas en cuando a inestabilidad de ladera se refiere. El resultado principal del trabajo se presenta como un mapa de susceptibilidad basado en una metodología de análisis multivariante, con el que, tras analizar también individualmente cada variable, se han identificado cuáles son las zonas de la isla más susceptibles frente a movimientos de ladera.

Por otro lado, el estudio individual de cada variable es importante para determinar cuál es la variable que influye en mayor medida la ocurrencia de movimientos de ladera, siendo en este caso la pendiente, ya que concuerdan la mayoría de los eventos de este tipo ocurridos en la isla, en zonas con fuertes pendientes, influyendo de forma más leve pero también importante las otras tres variables: precipitaciones extremas, litología y vegetación. Los resultados del mapa general y del mapa por municipios muestran cuáles son las zonas de la isla más susceptibles a movimientos de ladera. Los municipios de San Andrés y Sauces, y Santa Cruz de la Palma se presentan como los únicos dos municipios con una susceptibilidad muy alta, que se constata con la existencia de hasta 3 episodios recogidos en la prensa en los últimos años. Municipios con una susceptibilidad media en general pero con tendencia a la susceptibilidad alta, como son Barlovento, Puntallana y Tijarafe, también cuentan con episodios de movimientos de ladera que corroboran los resultados obtenidos. Un caso aparte podría ser el del Municipio de El Paso y en concreto de la Caldera de Taburiente, puesto que se trata de un municipio que tienen porcentajes en susceptibilidad baja, media y alta bastante equilibrados, pero, debido a pertenecer a este municipio la Caldera de Taburiente, cuenta con los mayores porcentajes de la isla en cuanto a susceptibilidad muy alta se refiere (14,1 %). Todos estos resultados obtenidos validan el método, las variables y las ponderaciones utilizadas en este estudio.

La realización de este estudio nos muestra que la isla de La Palma es un territorio en el que la investigación en el ámbito de los movimientos de ladera tiene un amplio desarrollo aún. El presente trabajo se puede complementar con otros, enfocados, por ejemplo, al riesgo que presenta esta susceptibilidad en la población, realizando cartografías sobre riesgo y vulnerabilidad asociados a movimientos de ladera, y abrir así nuevas líneas de investigación. Teniendo en cuenta las 4 variables utilizadas para el cálculo de la susceptibilidad, los escenarios que se nos presentan en el futuro, climatológicamente hablando, pueden hacer que alguna de ellas, como los episodios de precipitaciones extremas, se vean afectados en el futuro y, por lo tanto, afecten de manera importante a la susceptibilidad frente a movimiento de ladera en la isla, presentando nuevos frentes con nivel de susceptibilidad alta donde a día de hoy no existen. Tal y cómo se ha evidenciado, incorporar la variable de la peligrosidad sísmica en el análisis llevaría al estudio a un nivel de mayor detalle.

9. BIBLIOGRAFÍA

Arozena Concepción, M. E. & Panareda, J. M. (2010). Fenómenos meteorológicos y geomorfológicos extraordinarios como factores de dinámica de la laurisilva de Anaga (Tenerife, I. Canarias). In *Biogeografía: una ciencia para la conservación del medio*:(VI Congreso Español de Biogeografía, Alicante, 2010) (pp. 325-334). Asociación Española de Geografía.

Ayala, J. & Olcina, J. (2002): *Riesgos Naturales*. Barcelona, Ariel Ciencia.

Azañon, J. M., Pérez-Peña, J., Yesares, J., Rodríguez-Peces, M., Roldán, F., Mateos, R. & Martínez-Martínez, J. M. (2008). Metodología para el análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos en el parque nacional de Sierra Nevada mediante SIG. *Proy. De Investig En Parq Nac Convoc*, 2011, 7-24.

Barra, A., Colell, X., Echeverria, A., Trapero, L., Marturia, J., Fabregat, I. & Crosetto, M. (2021). El proyecto Mompá: protocolos de actuación basados en el monitoreo mediante interferometría satelital radar (INSAR). In *Proceedings 3rd Congress in Geomatics Engineering* (pp. 118-126). Editorial Universitat Politècnica de València.

Barredo Cano, J. & Gómez Delgado, M. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio (GIS and Multicriteria Evaluation Techniques for Urban and Regional Planning)*.

Barrera, J., García Moral, Ricardo, & Mohedas Guayerbas, Raúl. (2011). *Mapa geológico de Canarias. Memoria general*. Santa Cruz de Tenerife: GRAFCAN.

Berchiche & Guettouche (2018) Integration of an MCA-GIS approach for the modelling and assessment of mass movement risk. case of Aïn El Hammam, Basin of Tizi-Ouzou (Algeria). *Annals of the University of Oradea, Geography Series/Analele Universitatii Din Oradea, Seria Geografie*, 28(2).

Berrang-Ford, L., Siders, A. R., Lesnikowski, A., Fischer, A. P., Callaghan, M. W., Haddaway, N. R. & Abu, T. Z. (2021). A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature climate change*, 11(11), 989-1000.

Bethencourt González J. F. & Dorta Antequera, P. (2010). Episodios históricos de advecciones de polvo sahariano en la región de Canarias. In *Clima, ciudad y ecosistemas*:

ponencias y conferencias invitadas al VII Coloquio de la Asociación Española de Climatología (pp. 327-336).

Bonham-Carter, G. F. (1989). Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth sciences*, 171-183.

Boussouf, S., Irigaray, C. & Chacón, J. (1994). Movimientos de ladera y factores determinantes en la vertiente. *Rev. Soc. Geol. España*, 7, 3-4.

Broeckx, J., Rossi, M., Lijnen, K., Campforts, B., Poesen, J. & Vanmaercke, M. (2020). Landslide mobilization rates: A global analysis and model. *Earth-Science Reviews*, 201, 102972.

Cabildo de La Palma, 2023. “MDT coladas 19122021”. Recuperado de: <https://www.opendatalapalma.es/>

Carracedo, J. Torrado, J. & Hansen, A. (2005): “Análisis de los riesgos geológicos en el Archipiélago Canario, origen, características, probabilidades y tratamiento”. *Anuario de Estudios Atlánticos*. 51, pp 513-574.

Carracedo, J. (2011): *Geología de Canarias. I, Origen, evolución, edad y volcanismo*.

Editorial: Alcorcón (Madrid)

Centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2023). (MDT05). Recuperado de: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

Codina & Thomatis, S. (2005). Proyecto de estabilidad de taludes en el municipio de Santa Tecla, El Salvador.

Corominas, J. (2006). El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Cuaternario y geomorfología*, 20(3-4), 89-113.

Criado, C. & Dorta, P. (2003). An unusual ‘blood rain’ over the Canary Islands (Spain). The storm of January 1999. *Journal of Arid Environments*, 55(4), 765-783.

Crozier, M. J. (1986). *Landslides: causes, consequences, and environment*. (No Title).

De la Peña, J. M., López-Davalillo, J. G., Sanabria, M., Mayordomo, J. G., Aragón, R., Peces, M. J. R. & Marchal, J. D. (2016). Puntos y zonas susceptibles a movimientos de ladera por terremotos en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM). *Información de base para Protección Civil. Geotemas (Madrid)*, (16), 677-680.

- Del Arco Aguilar, M. J., González-González, R., Garzón-Machado, V. & Pizarro-Hernández, B. (2010). Actual and potential natural vegetation on the Canary Islands and its conservation status. *Biodiversity and Conservation*, 19, 3089-3140.
- Delgado, J., Peláez, J. A., Tomás, R., López Casado, C., Estévez, A., Doménech, C. & Cuenca, A. (2004). Incertidumbres en la determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante) (Vol. 2, pp. 165-175). Murcia.
- Delgado, J., Marques, F. S. F. & Vaz, T. (2013). Movimientos de ladera inducidos por terremotos en España y Portugal. *Cuaternario y geomorfología*, 3(27), 21-35.
- Di Benedetto, A., Ambrosino, A. & Fiani, M. (2022). Integrating Remote Sensing data to assess the protective effect of forests on rockfall: The case study of Monte San Liberatore (Campania, Italy). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU22-12743).
- Dorta Antequera, P. (1999). Las invasiones de aire sahariano en Canarias. Santa Cruz de Tenerife: Gobierno de Canarias.
- Dorta, P. (2007): "Catálogo de riesgos climáticos en Canarias: amenazas y vulnerabilidad", *Geographicalia*, nº 51, págs. 133-160
- Dorta Antequera, P., López Díez, A. & Díaz Pacheco, J. S. (2018). El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental. El caso de Canarias. Estado de la cuestión y perspectivas de futuro. *Cuadernos Geográficos*, 57(2), 27–52. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934>
- Dorta Antequera, P., López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Máyer Suárez, P. & Romero Ruiz, C. (2020). Turismo y amenazas de origen natural en la Macaronesia. Análisis comparado. *Cuadernos de turismo*, (45), 61-92.
- El Hamdouni, R. (2001). Estudio de Movimientos de Ladera en la Cuenca del Río Ízbor mediante un SIG: Contribución al Conocimiento de la Relación entre Tectónica Activa e Inestabilidad de Vertientes (Doctoral dissertation, Universidad de Granada).
- Emami, S. N., Yousefi, S., Pourghasemi, H. R., Tavangar, S. & Santosh, M. (2020). A comparative study on machine learning modeling for mass movement susceptibility mapping (a case study of Iran). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 5291-5308.

- Fernández, T., Pérez, J. L., Cardenal, J., Jiménez, C. C., Moya, F., Gómez, M. S. & Carpena Ruiz, R. (2016). Estimación de la actividad y la peligrosidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Guadalbullón (Jaén) mediante técnicas fotogramétricas y LiDAR. *Geotemas* (Madrid), (16), 661-664.
- Ferraz, U. Á. & Ezpeleta, A. M. (2022). Contrastes climáticos en la Isla de la Palma y su repercusión biogeográfica. In *Retos del cambio climático: impactos, mitigación y adaptación: aportaciones presentadas en el XII Congreso de la Asociación Española de Climatología*, celebrado en Santiago de Compostela entre el 19 y el 21 de octubre de 2022 (pp. 113-123). Asociación Española de Climatología.
- Font Tullot, I. (1956): "El tiempo atmosférico en las Islas Canarias". Madrid, Servicio Meteorológico Nacional. Serie A (memoria nº26).
- Font Tullot, I. (1959). El clima de las Islas Canarias. *Anuario de estudios atlánticos*, 1(5), 57-103.
- Font Tullot, I. (2000). *Climatología de España y Portugal* (Vol. 76). Universidad de Salamanca.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- Goumrassa, A., Guendouz, M. & Guettouche, M. S. (2021). GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis Approach (GIS-MCDA) for investigating mass movements' hazard susceptibility along the first section of the Algerian North-South Highway. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(10), 1-17.
- Gracia Pérez, D. (2023). Movilidad climática en el Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres. *Revista Catalana de Dret Ambiental*, 14(1).
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Madrid.
- Hammond, C. J., Prellwitz, R. W. & Miller, S. M. (1992, February). Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation. In *Proceedings of 6th international symposium on landslides*, Christchurch, New Zealand, Balkema (Vol. 2, pp. 251-294).
- Hemasinghe, H., Rangali, R. S. S., Deshapriya, N. L. & Samarakoon, L. (2018). Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka). *Procedia engineering*, 212, 1046-1053.

Hernández, J. H. (2022). Radionúclidos naturales en materiales volcánicos de la erupción de La Palma (2021).

Herrera, G., Mateos, R. M., García-Davalillo, J. C., Alonso, V., Mulas, J., Hernández, M. & Buxó, P. (2017). Los movimientos de ladera en España: hacia una base de datos conjunta. In IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, CINME (pp. 663-673).

Hervás, J., Barredo Cano, J. I. & Lomoschitz, A. (2002). Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio: aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria).

Huang, F., Chen, J., Liu, W., Huang, J., Hong, H. & Chen, W. (2022). Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and a critical rainfall threshold. *Geomorphology*, 408, 108236.

Huetz de Lemps, A. (1969): "Le climat de Illes Canaries". Paris. S.E.D.E.S.

Hutton, C. (1776). XXVIII. A new and general method of finding simple and quickly-converging series; by which the proportion of the diameter of a circle to its circumference may easily be computed to a great number of places of figures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (66), 476-492.

Irigaray, C. & Chacón, J. (2002). Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG. Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con la técnica SIG. *Fundamentos y aplicaciones en España*, 21-36.

Irigaray, C. (1995). Movimientos de ladera: Inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un sistema de información geográfica (SIG). Aplicación a las zonas de Colmenar (Ma), Rute (Co) y Montefrío (Gr) (Doctoral dissertation, Universidad de Granada).

Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J. & Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 909-926.

Jakob, M. (2022). Landslides in a changing climate. In *Landslide hazards, risks, and disasters* (pp. 505-579). Elsevier.

- Javier, D. N. & Kumar, L. (2019). Frequency Ratio Landslide Susceptibility Estimation in a Tropical Mountain Region. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4238, 173-179.
- Jones, F., Embody, R. & Peterson, C. (1961): "Landslides along the Columbia river valley, Northeastern Washington, U.S". Geological Survey Professional, 367, 1-98.
- Lario, J., Bardaji, T. & Herrera, G. (2016). Introducción a los riesgos geológicos. Madrid: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Leyva, S., Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., Miklin, L. & Santamarta, J. C. (2022). Rockfall and Rainfall Correlation in the Anaga Nature Reserve in Tenerife (Canary Islands, Spain). Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(4), 2173-2181.
- Lomoschitz, A. & Corominas, J. (1997): "La depresión de Tirajana, Gran Canaria. Una macroforma erosiva producida por grandes deslizamientos". Cuaternario y Geomorfología, 11, pp. 75-92.
- Lomoschitz, A. Barredo, J. & Hervás, J. (2002): "Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, Teledetección y Métodos de evaluación multicriterio. Aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria)". En: F. Ayala Carcedo y J. Corominas, (ed). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en Estapa, Instituto Geológico y Minero de España, pp. 169-180.
- López Díez, A., Dorta Antequera, P., Ruiz, M. C. & Pacheco, J. (2015). Movimientos de ladera en Canarias. El caso del Macizo de Anaga en el temporal de febrero de 2010. In Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación (pp. 1725-1734). Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.
- López Díez, A., Dorta Antequera, P., Díaz Pacheco, J. & Caraballo Acosta, O. (2018). Consecuencias de los eventos meteorológicos de rango extraordinario en Canarias: temporales de viento, inundaciones y fenómenos costeros (1996-2016).
- López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Dorta Antequera, P., Gherzi Da Gama, D. & Martín Raya, N. (2021a). Integración cartográfica del riesgo de inundación en La Palma (Islas Canarias). In Inundaciones y sequías: Análisis multidisciplinar para mitigar el impacto de los fenómenos climáticos extremos (pp. 329-342). Universitat d'Alacant/Universidad de Alicante.

- López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Dorta Antequera, P. & Máyer Suárez, P. (2021b). La evaluación del riesgo de inundación en el contexto local de adaptación al cambio climático. El caso de la isla de Tenerife. *Estudios Geográficos*, 82(291), e079. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202190.090>
- López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Dorta, P., García Rodríguez, I., Martín Raya, N. & Correa González, J. (2022). Caracterización de los fenómenos meteorológicos adversos en Canarias a través del análisis de las declaraciones de alertas y avisos (2009-2020).
- López- Saavedra, M. & Martí, J. (2022). Reviewing the multi-hazard concept. Application to volcanic islands. *Earth-Science Reviews*, 104286.
- Luque Poma, G. (2010). Susceptibilidad a los movimientos en masa en las áreas de Buldibuyo-Tayabamba, La Libertad-Perú.
- Martha T.R., van Westen C.J., Kerle N., Jetten V. & Vinod Kumar K. (2013) Landslide hazard and risk assessment using semi-automatically created landslide inventories. *Geomorphology* 184:139–150
- Martha, T. R., Roy, P., Govindharaj, K. B., Kumar, K. V., Diwakar, P. G. & Dadhwal, V. K. (2015). Landslides triggered by the June 2013 extreme rainfall event in parts of Uttarakhand state, India. *Landslides*, 12, 135-146.
- Martín Esquivel, J.L. (2010). Atlas de la biodiversidad de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria: Gobierno de Canarias.
- Martín Raya, N., Díaz Pacheco, J., López Díez, A., Dorta Antequera, P. & Cabrera, A. (2023a). A lava flow simulation experience oriented to disaster risk reduction, early warning systems and response during the 2021 volcanic eruption in Cumbre Vieja, La Palma. *Natural Hazards*, 1-21.
- Martín Raya, N., Díaz Pacheco, J., García Vaquero, M. & Correa González, J. (2023b). Metodología para la estimación del riesgo en base al coste aproximado del impacto de amenazas de origen natural en las edificaciones. In *Geografía: cambios, retos y adaptación: libro de actas. XVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía*, Logroño, 12 al 14 de septiembre de 2023 (pp. 209-218). Asociación Española de Geografía.

- Marzol, M.V. (1987): El régimen anual de las lluvias en el archipiélago Canario. *Ería*, 14, p. 187-194.
- Marzol, M.V. (1988): La lluvia, un recurso natural para Canarias. Santa Cruz de Tenerife. Caja General de Ahorros de Canarias.
- Marzol, M.V. (2001). El clima. En J.M. Fernández-Palacios y J.L. Martín Esquivel (Eds.), *Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación (87-94)*. Santa Cruz de Tenerife: Publicaciones Turquesa.
- Marzol, M.V. (2002): Lluvias e inundaciones en la ciudad de Santa Cruz de Tenerife. El agua y el clima, Palma de Mallorca, *El Agua en el clima, AEC, Serie A*, 3, p. 461-470.
- Marzol, M. V., & Máyer Suárez, P. (2012). Algunas reflexiones acerca del clima de las Islas Canarias. *Nimbus (Almería)*.
- Melillo, M., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Sarro, R., Mateos, R. M. & Brunetti, M. T. (2020). Rainfall and rockfalls in the Canary Islands: assessing a seasonal link. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2307-2317.
- Mora-Figueroa, A. L. (2015). Deslizamientos de las Islas Canarias: claves para su reconocimiento geológico. In *Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos: métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias* (pp. 135-156). Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Domaas, U., Rafat, R. & Peduzzi, P. (2006). Global landslides risk case study. *Natural disaster hotspots, case studies. Disaster risk management series*, (6), 21-77.
- Olcina Cantos, J. (2022). Paisajes de riesgo. Aspectos conceptuales, potencialidad didáctica en el aula y utilidad práctica en la planificación territorial / Risk landscapes. Conceptual aspects, didactic potentiality in the classroom and practical utility in spatial planning. *Ería*, 42(2), 173–185. <https://doi.org/10.17811/er.42.2022.173-185>
- Ormaetxea Arenaza, O. & Sáenz de Olazagoitia Blanco, A. (2017). Análisis y caracterización de los factores que intervienen en los movimientos de ladera y aproximación de la susceptibilidad en el País Vasco. *Lurralde: investigación y espacio*, 40, 81-109.

- Panchal, S. & Shrivastava, A. K. (2022). Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101626.
- Perálvarez, J. D. J. (2012). Movimientos de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada, España): identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG. Universidad de Granada.
- Perálvarez, J. D. J. (2021). Cartografía de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca media del río Beiro, Granada. *Revista Digital del Cedex*, (198), 31-44.
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. & Noormohamadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82, 1231-1258.
- Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F. & Turconi, L. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 10(2), 162.
- Rodríguez Ortiz, J.M., Prieto, C. & Hinojosa J.A. (1978). *Regional Studies on Mass Movements in Spain*.
- Rogers, C. T. & Sitar, N. (1994). Integrating expert opinion and empirical data to evaluate landslide hazard. In *I Simposio Panamericano de deslizamientos de tierra* (Vol. 1, pp. 264-279).
- Romero Ruiz, C. (1990). *Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario*.
- Rosselló, J., Becken, S. & Santana-Gallego, M. (2020). The effects of natural disasters on international tourism: A global analysis. *Tourism management*, 79, 104080.
- Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M. & Lopez-Gunn, E. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 243-270.
- Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A. & Marturià, J. (2002): “Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un sistema de información geográfica. Aplicación a la Poble de Lillet (Pirineo Oriental)” En: Ayala-Carcedo, F., Corominas, J. (eds). *Mapas de susceptibilidad a los*

movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España. Instituto Geológico y Minero de España. 55-82.

Santamarta Cerezal, J. C. & Naranjo Borges, J. (2015) Degradación de espacios naturales en la Región de la Macaronesia.

Sistema de información Territorial de Canarias (SITCAN, 2023). Mapa geotécnico de Canarias 1:25000. Recuperado de: <https://opendata.sitcan.es/dataset/mapa-geotecnico-de-canarias>

Szeibert, W. T., Tomás, R., Liu, X., López-Sánchez, J. M., Díaz, E. & Zhao, C. (2022, September). Empleo de imágenes PAZ para la monitorización de un movimiento de ladera en Alcoy (Alicante) mediante interferometría SAR diferencial. In X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España (pp. 13-16).

Tang, Y., Feng, F., Guo, Z., Feng, W., Li, Z., Wang, J. & Li, Y. (2020). Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: A comparative study from the loess plateau area in Shanxi (China). *Journal of Cleaner Production*, 277, 124159.

Tehrany, M. S., Pradhan, B. & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hydrology*, 512, 332-343.

Terlien, M. T. J. (1996). Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: the integration of hydrologic models, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia). International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC).

Thiery, Y., Terrier, M., Colas, B., Fressard, M., Maquaire, O., Grandjean, G. & Gourdiér, S. (2020). Improvement of landslide hazard assessments for regulatory zoning in France: STATE-OF-THE-ART perspectives and considerations. *International journal of disaster risk reduction*, 47, 101562.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

Wu, X., Chen, X., Zhan, F. B. & Hong, S. (2015). Global research trends in landslides during 1991–2014: a bibliometric analysis. *Landslides*, 12, 1215-1226.

Xie, W., Nie, W., Saffari, P., Robledo, L. F., Descote, P. Y. & Jian, W. (2021). Landslide hazard assessment based on Bayesian optimization–support vector machine in Nanping City, China. *Natural Hazards*, 109(1), 931-948.

Yepes Temiño, J., Rodríguez-Peces, M. J., Marchesini, S., Leyva, S., & Díaz-Hernández, J. L. (2011). Amplificación del efecto destructivo de los desprendimientos rocosos por deslizamiento sobre suelos volcánicos (Tenerife y Madeira).