



Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos en la costa ligados al cambio climático

Actividad E.4.1.1: Informe técnico sobre la obtención de los mapas de susceptibilidad a los desprendimientos

Informe del GT4: Herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa

Due date of deliverable: 30/10/2020
Actual submission date: 13/11/2020

Lead contractor for this deliverable: IGME

Autores

Cristina Reyes, Rike Mauter, Rosa María Mateos, Roberto Sarro, Eduardo Peña, Mónica Martínez, Jorge Pedro Galve, José Miguel Azañón, Agustín Millares, Marina Cantalejo, Juan Martín, Pedro Martín, Santiago Martín

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF)



Índice

1	INTRODUCCIÓN	3
2	DATOS PREVIOS AL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	4
2.1	Variable dependiente: inventario de movimientos de ladera	6
2.2	Variables independientes	6
2.2.1	Pendientes.....	7
2.2.2	Litologías	8
2.2.3	Uso del suelo.....	9
3	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	10
4	RESULTADOS: MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESPRENDIMIENTOS.....	12
5	REFERENCIAS.....	16

1 INTRODUCCIÓN

El GT4 de RISKCOAST se focaliza en el desarrollo de herramientas informáticas, cartográficas y matemáticas para el apoyo a sistemas de alerta temprana y a la gestión de catástrofes. Estas herramientas estarán basadas en diferentes técnicas innovadoras como la monitorización DInSAR satelital y terrestre, drones, o en simulaciones matemáticas basadas en análisis espectral. El resultado será una serie de herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa, mejorando así las capacidades de prevención de las autoridades competentes.

La Actividad 4.4 - Desarrollo de modelos de predicción a la caída de rocas basados en umbrales de lluvia- se basa en los siguientes objetivos: (i) generar una cartografía específica de desprendimientos rocosos basada en modelización numérica, que permita evaluar cuantitativamente la peligrosidad por desprendimientos. (ii) estimar las pérdidas económicas potenciales que estos eventos podrían causar por su afección a las infraestructuras. (iii) definir los umbrales de lluvia empíricos que pueden desencadenar los desprendimientos de rocas.

El primer punto lo abarca la Actividad 4.4.1 - *Informe técnico sobre la obtención de los mapas de susceptibilidad a los desprendimientos*- con el objetivo de obtener unos productos cartográficos específicos para la susceptibilidad de desprendimientos rocosos. Estos productos se apoyarán en la modelización numérica, con numerosas variables de entrada: morfométricas, derivadas del modelo digital del terreno (MDT), litológicas, para considerar el comportamiento mecánico de las rocas y de usos del suelo. El presente informe, se ha focalizado en una de las zonas de estudio: la provincia de Granada, dentro de la región SUDOE de Andalucía.

La coordinación del GT4 está a cargo del equipo CTTC, que establece los procedimientos metodológicos para la producción de herramientas cartográficas y de monitorización para la de prevención de riesgos costeros. La aplicación de

estas metodologías a las diferentes áreas de estudio será desarrollada por cada uno de los beneficiarios participantes en GT4.



Figura 1. Localización geográfica de la Provincia de Granada, donde se ha realizado el análisis de susceptibilidad a los desprendimientos rocosos

2 DATOS PREVIOS AL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

La evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera se basa en el Principio del Actualismo: es probable que se produzcan movimientos de ladera bajo unas condiciones o situaciones similares a las existentes en aquellos movimientos de ladera que ocurrieron en el pasado.

En la literatura científica, la susceptibilidad (*susceptibility*) y peligrosidad (*hazard*) por movimientos de ladera se utilizan a menudo como sinónimos, aunque se refieren a conceptos diferentes. La susceptibilidad se entiende como la probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera en un área determinada, controlada por un conjunto de condiciones. La peligrosidad describe, además, la

magnitud y la componente temporal y, por tanto, tiene en cuenta los factores desencadenantes. Así, los análisis de susceptibilidad y peligrosidad componen en una parte importante de la gestión del riesgo (*risk*) por movimientos de ladera (Figura 2).

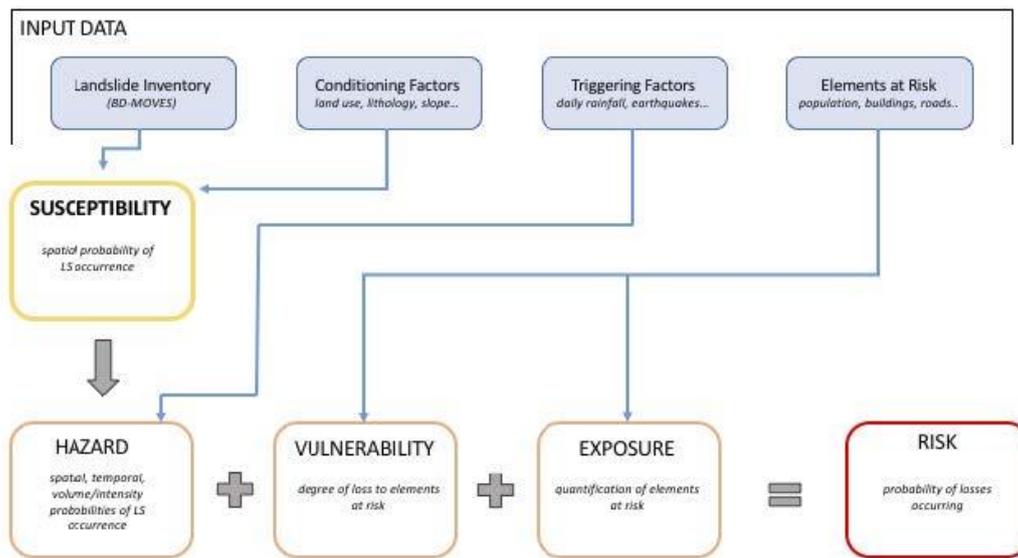


Figura 2. Esquema metodológico de la evaluación del riesgo por movimientos de ladera.

Para los análisis de susceptibilidad, el conocimiento de los factores condicionantes es fundamental. Los factores condicionantes son aquellos que describen las características físicas y/o ambientales que influyen en la estabilidad de las laderas. Entre los factores condicionantes más significativos están: el ángulo de inclinación o pendiente de la ladera, la litología, el grado de alteración superficial de los materiales, su contenido en agua, la curvatura y orientación de la ladera, la cobertura vegetal del suelo, etc.

Por otro lado, los factores desencadenantes determinan la distribución temporal de los deslizamientos de ladera. Estos pueden ser inducidos por la acción humana, como la deforestación o actividades mineras, o pueden ser inducidos naturalmente por precipitaciones intensas y/o prolongadas, deshielo rápido, actividad volcánica, terremotos, riadas, etc.

RISKCOAST 4.4.1: Informe técnico sobre la obtención de los mapas de susceptibilidad a los desprendimientos

2.1. Variable dependiente: inventario de movimientos de ladera

La variable dependiente en el análisis de susceptibilidad define la presencia o ausencia de movimientos de ladera. Para el análisis de susceptibilidad que se ha realizado, los datos de movimientos del terreno se obtuvieron del inventario nacional y base de datos MOVES del IGME. Para más detalles sobre el inventario de movimientos de ladera, consultar Actividad E2.1.1 (“Informe técnico sobre los inventarios de movimientos de ladera en la provincia de Granada”).

En la provincia de Granada, el inventario cuenta con un total de registros de 5.646 movimientos de ladera, de los cuales 1.038 son desprendimientos rocosos (Figura 3).

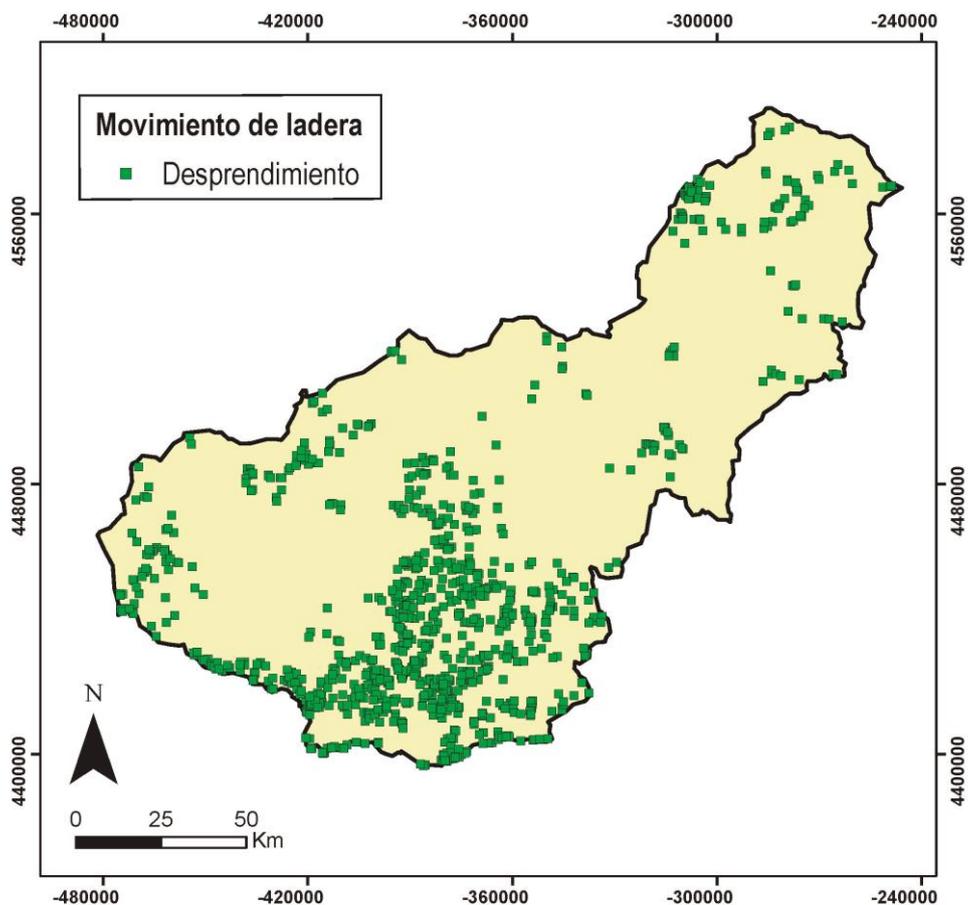


Figura 3. Mapa de los desprendimientos recopilados en el inventario de movimientos de ladera BD-MOVES (IGME)

RISKCOAST 4.4.1: Informe técnico sobre la obtención de los mapas de susceptibilidad a los desprendimientos

2.2. Variables independientes

Las variables independientes definen los factores condicionantes. Para el presente análisis, se han utilizado los siguientes: el ángulo de pendiente, litología y uso del suelo, ya que se consideran los factores más influyentes en la zona.

2.2.1. Pendiente

El ángulo de la pendiente de las laderas se derivó del modelo de elevación digital PNOA del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con un tamaño de pixel de 5x5m. Los valores se clasificaron en 8 intervalos (Figura 4).

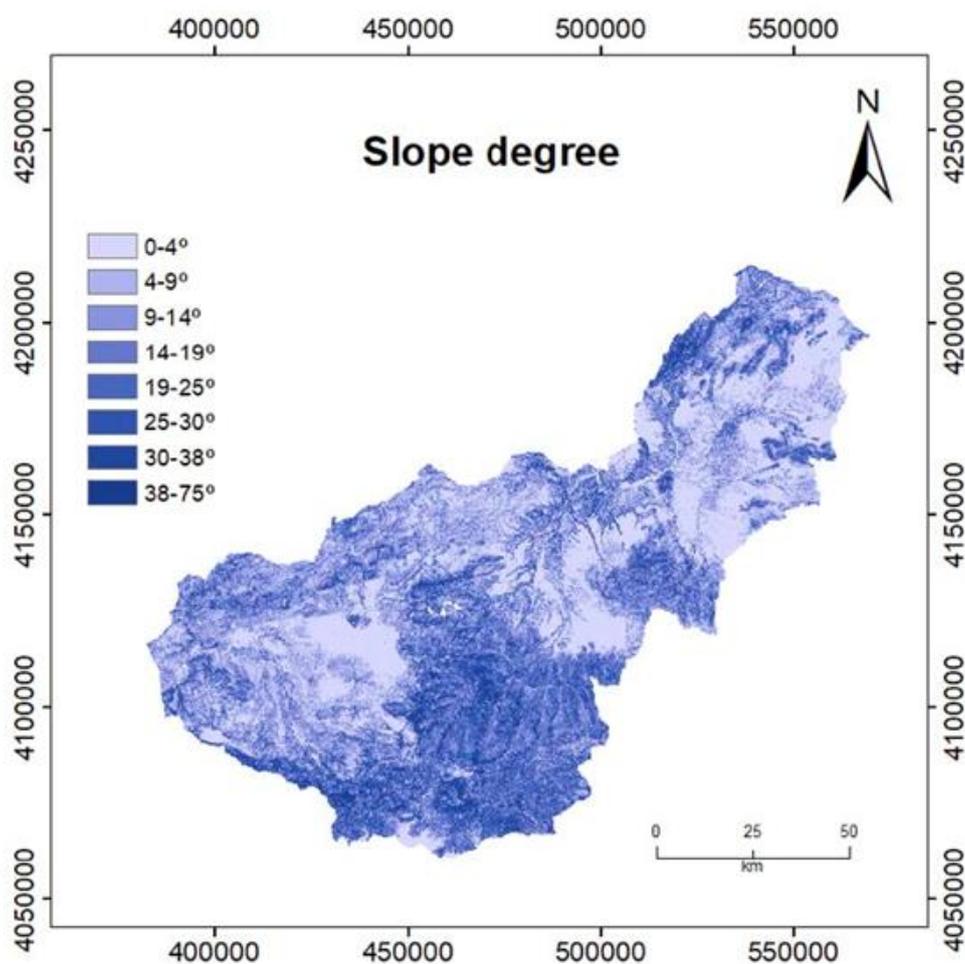


Figura 4. Mapa de pendientes de la Provincia de Granada, con 8 intervalos de pendientes

2.2.2. Litología

La información referente a los tipos de litología se obtuvo del mapa geológico continuo de España a escala 1: 50.000, realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Es un parámetro muy importante del que dependen la resistencia y la permeabilidad de los materiales. El mapa geológico de la provincia de Granada consta de más de 200 unidades litológicas diferentes. Para el presente estudio, se llevó a cabo una reclasificación de las unidades en 7 clases, según la dureza de la roca obtenida en base al valor de resistencia a compresión simple del material (Figura 5).

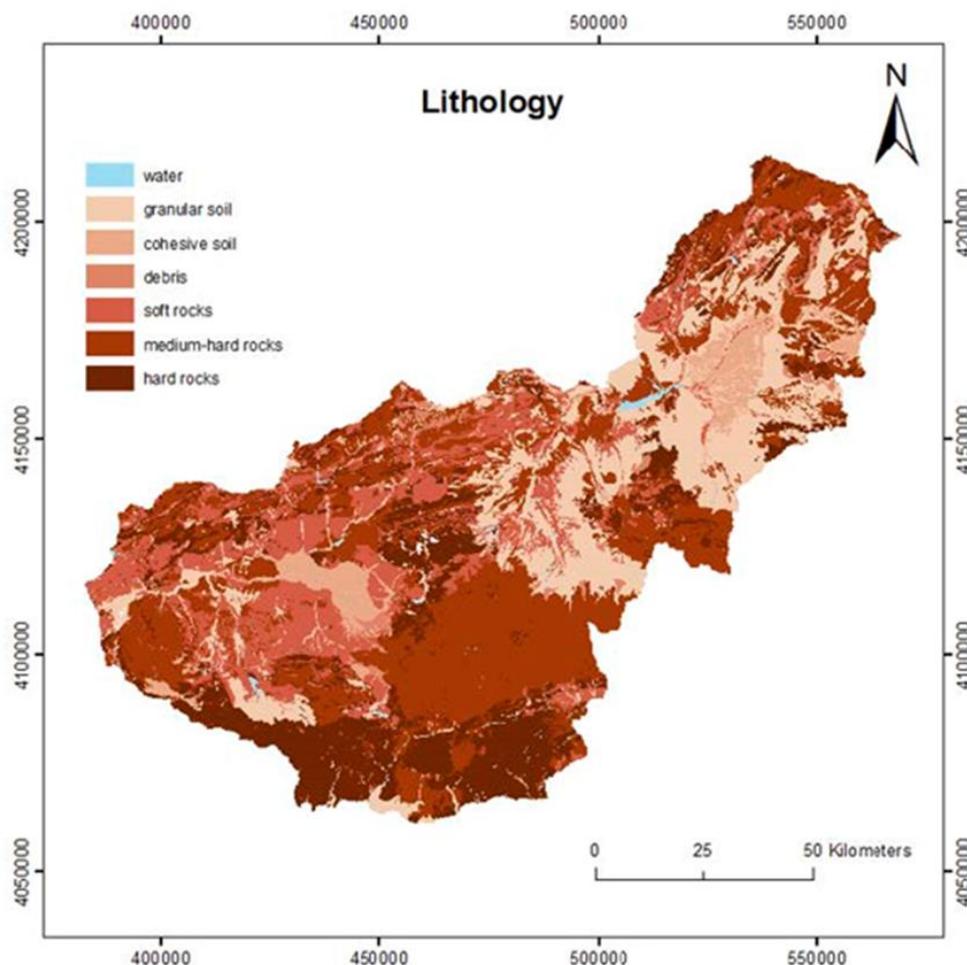


Figura. 5. Mapa litológico de la Provincia de Granada con 7 clases establecidas en base a la dureza (resistencia a compresión simple de los materiales).

2.2.3. Uso del suelo

El uso del suelo se considera un factor muy importante ya que las zonas altamente vegetadas, con un buen desarrollo de raíces en el subsuelo, favorecen la estabilidad de las laderas. La información sobre usos del suelo fue obtenida del mapa CORINE realizado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:10.000 en 2012. Para este estudio, las 35 clases existentes en el mapa CORINE se han simplificado en 7 categorías (Figura 6).

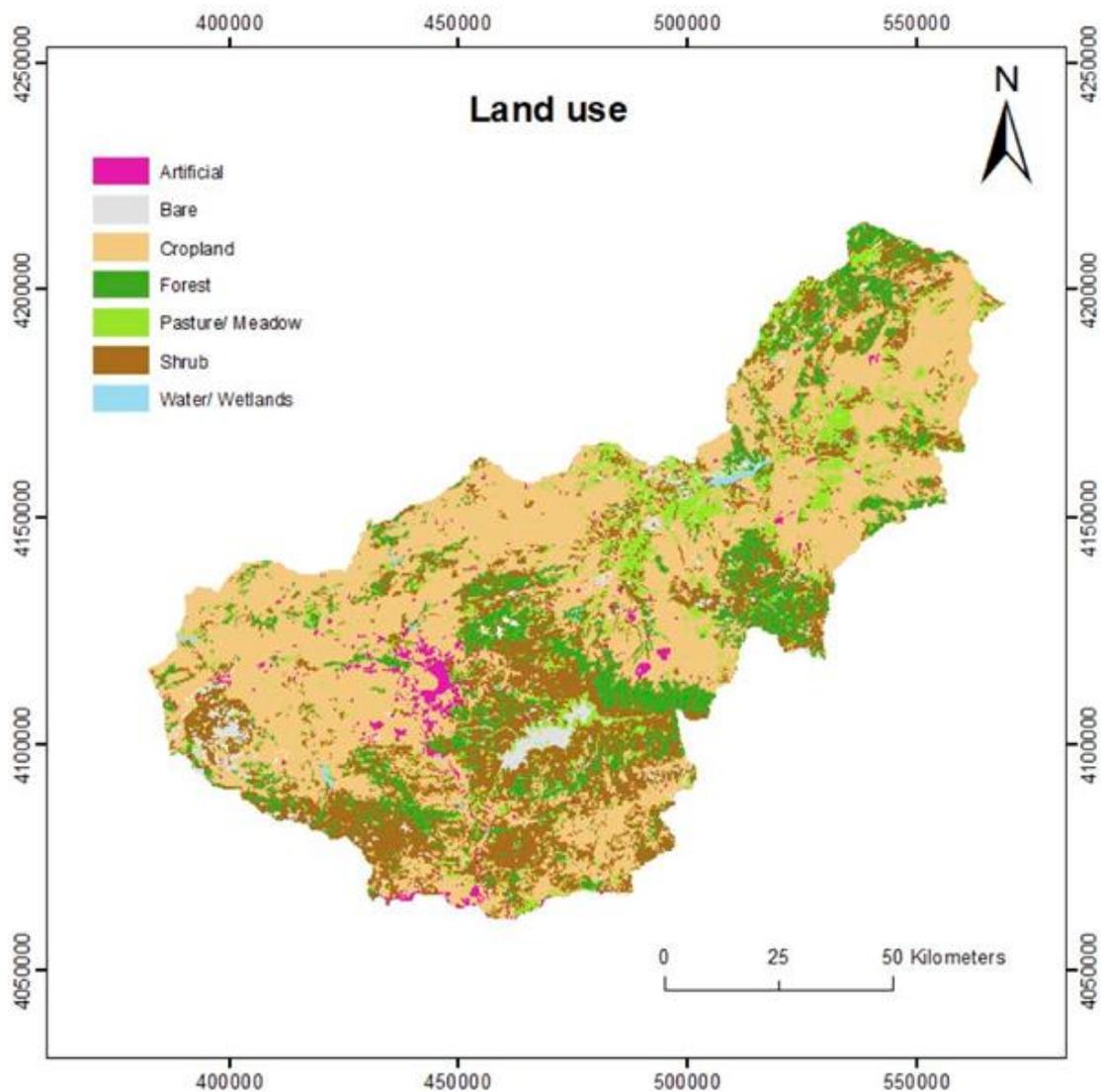


Figura 6. Mapa de usos del suelo de la Provincia de Granada (CORINE)

3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

Existen multitud de metodologías para realizar mapas de susceptibilidad, cada una con sus ventajas y limitaciones. Los métodos cualitativos (heurísticos) dependen del conocimiento del experto, que puede establecerse mediante observaciones de campo (Kienholz, 1978) o indirectamente asignando pesos a determinados parámetros en los mapas (Malet et al. 2008; Barredo et al., 2000). Los métodos heurísticos a menudo carecen de un conocimiento suficiente sobre el área de estudio y tienen una alta subjetividad. Por ello, no se recomiendan para evaluaciones de la susceptibilidad en grandes áreas.

En las últimas décadas, con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han proliferado los métodos cuantitativos para el análisis de susceptibilidad. Estos métodos incluyen métodos deterministas, estadísticos y probabilísticos. Los **métodos deterministas** (Terlien et al., 1995) solo tienen en cuenta los factores contribuyentes o condicionantes sin incluir datos históricos de movimientos de ladera, por lo que son bastante útiles para zonas con un escaso registro de movimientos. Estos métodos utilizan modelos físicos, que incluyen análisis de estabilidad de taludes y análisis hidrológicos, para calcular los mecanismos de rotura. Sin embargo, la información requerida (propiedades mecánicas, grado de saturación, etc.) son generalmente difíciles de obtener para zonas amplias, por lo que este método es recomendado únicamente para investigaciones locales. Los **métodos estadísticos bivariados** (probabilísticos) y multivariados se utilizan con frecuencia para análisis de susceptibilidad, ya que pueden aplicarse a gran y pequeña escala y son métodos objetivos. Los **métodos probabilísticos** (bivariados), como el de Razón de Frecuencia (Khan et al., 2019, Mezughi, 2011), asignan el peso de cada parámetro según la cantidad de deslizamientos asociados a los factores condicionantes (pendiente, litología y uso del suelo). A diferencia del método bivariado, el método multivariado analiza todas las variables independientes simultáneamente. La presencia o ausencia de movimientos de ladera se analiza mediante una matriz

que posteriormente se analiza mediante regresión múltiple o regresión logística (Hemasinghe et al., 2018; Wang, 2011). Existen otros métodos más recientes para el análisis de susceptibilidad, como las Redes Neuronales Artificiales (ANN) (Ermini et al., 2005; Farrokhzad et al., 2011; Tsangaratos y Benardos, 2014).

En la provincia de Granada, se ha aplicado el método de Razón de Frecuencia (FR). Este es un método probabilístico comúnmente utilizado para el análisis de susceptibilidad de movimientos de ladera basado en las relaciones espaciales observadas entre los factores condicionantes y los eventos (movimientos) ocurridos. Los tres factores condicionantes que se tienen en cuenta: pendiente, litología y usos del suelo se convirtieron a formato de cuadrícula (*grid*) y se calcularon los valores de FR para cada factor de la siguiente manera:

$$FR = \frac{LS_{ji}/LS}{A_{ji}/A}$$

Donde: LS_{ji} / LS define el área de movimientos de ladera en una determinada clase, dividida por el área de todos los movimientos. A_{ji} / A es el área de la clase dividida por el área total de estudio.

$FR > 1$ indica una correlación más alta, mientras que $FR < 1$ indica una correlación débil. Se utilizaron valores de FR normalizados (frecuencia relativa) para reclasificar las clases. Finalmente, para calcular el Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI), el FR de las tres clases se resumieron con la calculadora ráster con la siguiente ecuación:

$$LSI = \sum FR_t$$

4 RESULTADOS: MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS EN LA PROVINCIA DE GRANADA

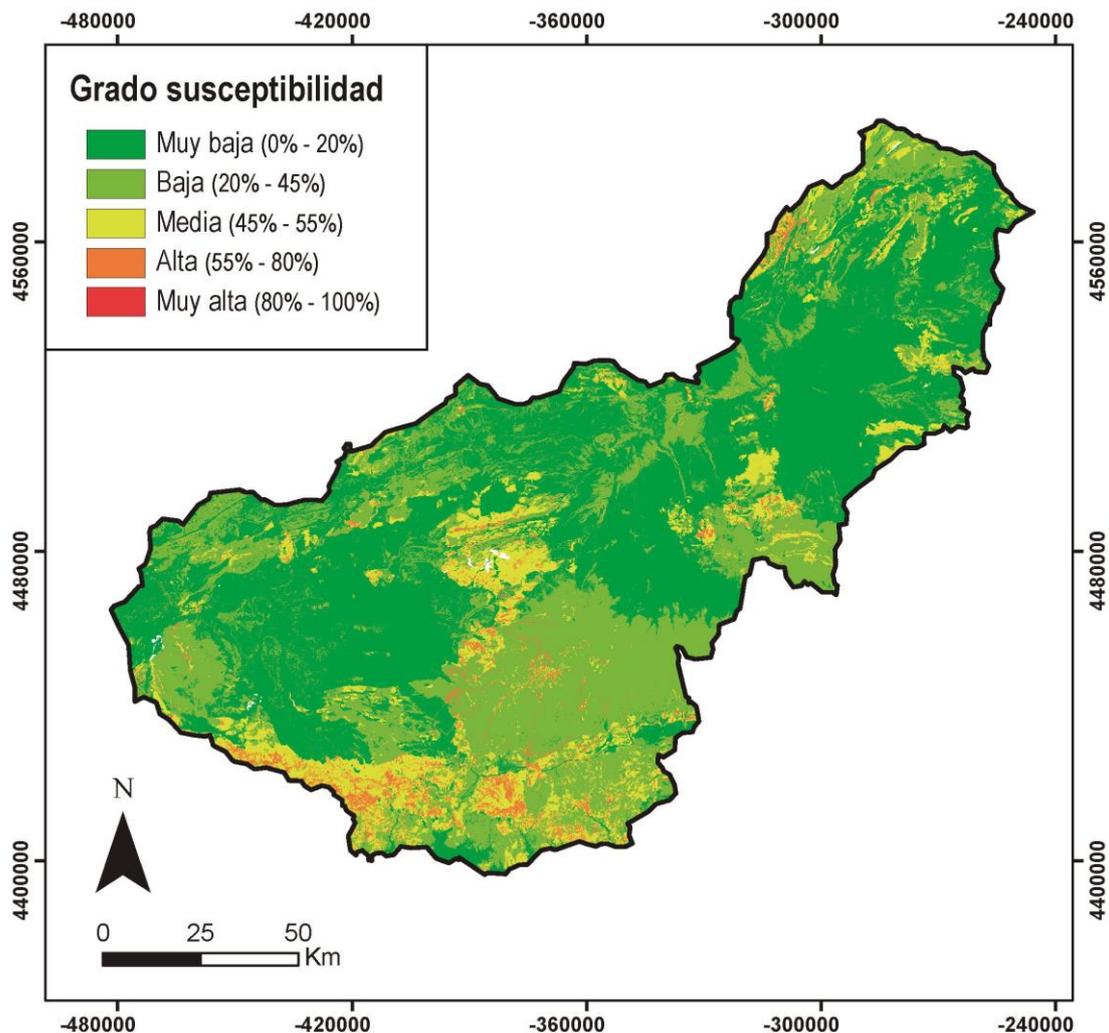


Figura 7. Mapa de susceptibilidad de desprendimientos de roca en la provincia de Granada.

La Figura 7 muestra el mapa de susceptibilidad de desprendimientos de roca en la provincia de Granada. Los valores mayores de susceptibilidad se encuentran esencialmente en el sur de la provincia y principalmente, en la franja costera. Los desprendimientos aparecen asociados a zonas montañosas de pendientes

moderadas o altas, como son la Sierra de Cazorla (norte de la provincia), Sierra de Huétor (zona central de la provincia), o las sierras de Tejeda y Lújar (zona sur de la provincia). También son proclives a generarse en algunas zonas de Sierra Nevada, como en las cumbres más altas o en los principales barrancos, asociados nuevamente, a las altas pendientes.



Figura 8. Fotografía en la cual se aprecian vuelcos y desprendimientos de rocas carbonatadas al pie de la ladera en el entorno del pueblo de Lanjarón (Alpujarra granadina).

También existe una orla de valores de susceptibilidad media-alta que bordea el sur de Sierra Nevada, a lo largo de la Alpujarra granadina. En este caso, la probabilidad de ocurrencia de desprendimientos se condiciona por factores litológicos, ya que abundan rocas duras carbonatadas muy tectonizadas y fracturadas (Figura 8) que se encuentran sobre rocas de menor cohesión (filitas).

Generalmente, esta situación favorece a la inestabilidad de las laderas de toda la zona de La Alpujarra granadina.



Figura 9. Vista ampliada del mapa de susceptibilidad a desprendimientos de roca en la Costa de Granada, donde se indican las principales localidades (La Herradura, Almuñécar y Salobreña) y algunas de las principales urbanizaciones costeras.

La Figura 9 muestra una vista ampliada de la Costa Tropical de Granada, desde las localidades de La Herradura hasta Salobreña donde se indican, además, las principales urbanizaciones costeras. A lo largo de esta franja, de especial interés para su estudio en RISKCOAST, se han obtenido varias zonas con valores de susceptibilidad media-alta e incluso muy alta. Algunas las zonas que pueden verse afectadas por desprendimientos, donde ya se aprecian multitud de bloques caídos: son la playa de Calaiza (Figura 10), al pie de la urbanización Cármenes del Mar, la playa del Muerto (Figura 11), al pie de la urbanización Cotobro así como la propia urbanización Cotobro y sus proximidades (Figura 12).



Figura 10. Playa de Calaiza, al pie de la urbanización Cármenes del Mar, donde se aprecian multitud de bloques caídos.



Figura 11. Playa del Muerto y urbanización Cotobro (Almuñécar). Nótese las altas pendientes de los acantilados y de los muros de contención construidos para evitar la caída de bloques en la playa.



Figura 12. Fotografías que muestran la afección por desprendimientos de roca en el entorno de la urbanización Cotobro (Túnel Punta de la Mona). En la imagen izquierda, se aprecia una labor de reparación de la ladera y retirada de bloques. En la imagen derecha, se aprecia un desprendimiento que rompió la malla de contención del talud y obstaculizó la Carretera Nacional N-340.

Otra zona de valores de susceptibilidad de valores medios-altos se refiere a la franja de las urbanizaciones Delta, Alfamar y Costa Aguilera. La inestabilidad de estas laderas costeras se debe, principalmente, a la existencia de rocas poco coherentes y muy fracturadas, esencialmente esquistos y filitas. Otro factor influyente son las pendientes moderadas o altas, sobre todo en los acantilados

más próximos al mar, que llegan a alcanzar pendientes de hasta 40° (Figura 11). Cabe destacar el valor de susceptibilidad muy alta en la localidad de Salobreña, que está asociado al escarpe del peñón donde se asienta el pueblo y el castillo árabe. Este escarpe tiene un largo historial por desprendimientos rocosos y, en la actualidad, el camino de acceso litoral al castillo está cerrado por esta problemática (Figura 13).



Figura 13. Fotografías del escarpe del peñón del castillo de Salobreña. Se aprecian varios bloques caídos que han obstaculizado el sendero litoral de acceso

5 REFERENCIAS

- Barredo, J., Benavides, A., Hervás, J., and van Westen, C. J., 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2 (1), 9–23.
- Ermini, L., Catani, F., and Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66 (1), 327–343.

RISKCOAST 4.4.1: Informe técnico sobre la obtención de los mapas de susceptibilidad a los desprendimientos

- Farrokhzad, F., Barari, A., Choobbasti, A. J., and Ibsen, L. B., 2011. Neural network-based model for landslide susceptibility and soil longitudinal profile analyses: Two case studies. *Journal of African Earth Sciences*, 61 (5), 349–357.
- Hemasinghe, H., Rangali, R. S. S., Deshapriya, N. L., and Samarakoon, L., 2018. Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka). *Procedia Engineering*, 212, 1046–1053.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., and Calligaris, C., 2019. Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22 (1), 11–24
- Kienholz, H., 1978. Maps of Geomorphology and Natural Hazards of Grindelwald, Switzerland: Scale 1:10,000. *Arctic and Alpine Research*, 10 (2), 169–184.
- Malet, J.-P., Thiery, Y., Hervás, J., Günther, A., Puissant, A., and Grandjean, G., 2008. Landslide susceptibility mapping at 1:1 M scale over France: exploratory results with a heuristic model. Presented at the First French Conference on Landslides, At Orléans.
- Mezugh, 2011. Landslide Susceptibility Assessment using Frequency Ratio Model Applied to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*, 7 (1), 43–50
- Terlien, M. T. J., Westen, C. J. van, and Asch, T. W. J. van, 1995. Deterministic modelling in GIS – based landslide hazard assessment. *Geographical information systems in assessing natural hazards: selected contributions from the international workshop held in Perugia on September 20-22 1993 (Advances in natural and technological hazards research; 5)*, 57–77
- Tsangaratos, P. and Benardos, A., 2014. Estimating landslide susceptibility through an artificial neural network classifier. *Natural Hazards*, 74 (3), 1489–1516.

Wang, L., 2011. Landslide Susceptibility Mapping by Using Logistic Regression Model with Neighborhood Analysis: A Case Study in Mizunami City. International Journal of Geomate.