



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Susceptibilidad de deslizamientos a escala regional. Análisis y visualización de resultados orientados a la gestión del territorio.

Trabajo realizado por:

Tamires Suelen de Sá Braga

Dirigido por:

Marcel Hürlimann Ziegler

Nieves Lantada Zarzosa

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, **20 de junio 2021**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

ABSTRACT

The susceptibility to landslides can be interpreted as a tendency of a region to generate landslides (Guzzetti et al., 2006). Given that these phenomena on a regional scale can be triggered by various factors usually not available at this magnitude, it is common to use digital elevation models in landslide analysis and, in some cases, based on information from land use and geological maps (Palau et al., 2020).

The main objective of this study is to estimate the probability of failure on a regional scale based on georeferenced data and to generate a landslide susceptibility map having hydrological units as terrain units. On the other hand, various criteria for grouping the susceptibility classes are proposed and evaluated.

The Fast Shallow Landslide Assessment Model (FSLAM) is an alternative for calculating susceptibility on a regional scale in which rainfall is taken as the main factor in the analysis. The model is more sensitive to antecedent rain than to that of the event, but it is most sensitive to cohesion (Medina et al., 2021). In the present study, the FSLAM was used to calculate the landslide susceptibility in an area of 405 km², with a Mediterranean climate and located in the Montseny park, in Catalonia.

In this analysis, the rain accumulated during the Gloria storm was considered as precipitation of the event. For this rainfall, maximum rainfall of 458.71 mm was estimated for the study area. As antecedent rain, a daily average rainfall was calculated, less than 1 mm / day. After the event, the increases in the probability of failure observed were less than 5% in 88.68% of the territory. Likewise, the pixels with the highest susceptibility are concentrated mainly in the areas of more rugged relief. However, in the flatter areas, there is a predominance of failure probabilities of less than 0.15.

Basins and half basins maps were generated with the digital elevation model as input data with different values of the minimum number of pixels. This parameter was very important, since it affects the areas of the polygons, their distribution on the map and their morphology. Five possible values of the minimum number of pixels equal to 1 million, 750, 500, 250 and 100 thousand were studied. The results showed that there is a more equitable distribution of areas with the basins with smaller minimum sizes.

Eight grouping criteria were studied: three statistical and another five criteria proposed in this study called "A" to "E". Criterion "C" provided the most satisfactory result.

As a general conclusion of the study, it is verified that landslide susceptibility maps can be generated at a regional scale at low computational cost with the FSLAM. This code provides data on the probability of failure that can be represented through landslide susceptibility maps, taking as TUs half basins and the appropriate grouping criteria.

RESUMEN

La susceptibilidad de deslizamientos puede ser interpretada como una tendencia de una región en generar deslizamientos (Guzzetti et al., 2006). Dado que estos fenómenos a escala regional pueden ser desencadenados por varios factores usualmente no disponibles a esta magnitud, es común emplearse en los análisis de deslizamientos modelos digitales de elevación y, en algunos casos con base en la información de usos del terreno y mapas geológicos (Palau et al., 2020).

El objetivo principal de este estudio es estimar la probabilidad de rotura a escala regional con base en datos georreferenciados y generar un mapa de susceptibilidad de deslizamiento teniendo como unidades de terreno, las unidades hidrológicas. Por otra parte, se proponen y evalúan diversos criterios de agrupación de las clases de susceptibilidad.

El *Fast Shallow Landslide Assessment Model* (FSLAM) es una alternativa para el cálculo de susceptibilidad a escala regional en el cual las precipitaciones son tomadas como principal factor en el análisis. El modelo es más sensible a la lluvia antecedente que a la del evento, pero principalmente es más sensible a la cohesión (Medina et al., 2021). En el presente estudio se utilizó el FSLAM para calcular la susceptibilidad de deslizamiento en un área de 405 km², con clima mediterráneo y ubicada en el parque de Montseny, en Catalunya.

En este análisis se consideró como precipitación del evento la lluvia acumulada durante la ia. Para esta lluvia, se estimaron precipitaciones máximas de 458,71 mm para el área de estudio. Como lluvia antecedente se calculó un promedio de precipitaciones diario, inferiores a 1 mm/día. Tras el evento, los incrementos de probabilidad de rotura observados fueron inferiores al 5% en 88,68% del territorio. Asimismo, los píxeles con mayor susceptibilidad se concentran principalmente en las zonas de relieve más accidentado. Sin embargo, en las zonas más llanas, se tiene la predominancia de probabilidades de roturas inferiores a 0,15.

Se generaron mapas de cuencas y medias cuencas hidrográficas teniendo como dato de entrada el modelo digital de elevación con diferentes valores de número mínimo de píxeles. Este parámetro se mostró de suma importancia, visto que afecta las áreas de los polígonos, su distribución en el mapa y su morfología. Se estudiaron cinco posibles valores de número mínimo de píxeles iguales a 1 millón, 750, 500, 250 y 100 mil. Los resultados mostraron que se tiene una distribución más equitativa de áreas con las cuencas con menores tamaños mínimos.

Se estudiaron ocho criterios de agrupación: tres criterios estadísticos y otros cinco criterios propuestos en este estudio denominados de “A” a “E”. El criterio “C” proporcionó el resultado más satisfactorio.

Como conclusión general del estudio se verifica que se puede generar mapas de susceptibilidad de deslizamientos a escala regional a bajo coste computacional con el FSLAM. Este código proporciona datos de probabilidad de rotura que pueden ser representados a través de mapas de susceptibilidad de deslizamientos teniendo como UTs las medias cuencas hidrográficas y los criterios de agrupación adecuados.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a Amparo Núñez, Marcel Hürlimann y Nieves Lantada por todo el soporte y disponibilidad para guiarme durante todas las etapas de la elaboración de este trabajo.

Este estudio también contó con el soporte de David Lerin, Ona Torra y Zizheng Guo. Ambos fueron esenciales para el seguimiento de la investigación realizada.

También me gustaría agradecer a los amigos que gracias a la UPC he tenido la oportunidad de conocer y compartir experiencias inolvidables. Entre ellos: Rocío Cornejo, Karina Campiño, Julio Campos y Abercio Cañas. Muchas gracias por todo el ánimo y soporte durante los meses de realización de este estudio.

También no hubiera sido capaz de dedicarme a este trabajo si no fuera por el cariño e incentivo de mi familia, en especial de mi hermana Brunna de Sá Braga y de mi pareja Eric Serra i Paradis, a quienes considero como fuente de inspiración y de motivación en los retos de mi vida.

También me gustaría agradecer a mis tutores de las prácticas en empresa Manuel Murias Pini y Maria Barcardit, los cuales siempre me incentivaron y me proporcionaron la flexibilidad de jornada necesaria para concluir este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Motivación	6
1.2. Objetivos del trabajo	7
2. ANTECEDENTES EN LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS	8
3. ZONA DE ESTUDIO	10
3.1. Descripción de la zona de estudio	10
3.2. Datos disponibles	12
4. METODOLOGÍA	15
4.1. FSLAM	15
4.1.1. Descripción del modelo	15
4.1.2. Datos de entrada y salida en el FSLAM	17
4.2. Unidades del terreno	25
4.3. Criterios de agrupación	26
5. RESULTADOS	29
5.1. FSLAM	29
5.2. Representación con diferentes unidades de terreno	31
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	46
7. REFERENCIAS	48
ANEXO I	50

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Los diferentes tipos de deslizamientos desencadenados por las lluvias afectan a diversas regiones y países del mundo causando daños que suelen ser enormes (Aleotti & Chowdhury, 1999). Debido a la magnitud e implicación asociadas a estos daños, en la literatura se encuentran diversos modelos para calcular la susceptibilidad de deslizamientos, la cual puede ser definida como la probabilidad de que una condición razonablemente estable pueda cambiar abruptamente (Scheidegger, 1994).

Por otro lado, a escala regional, la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos con modelos físicos, es decir, que tengan en cuenta las propiedades del terreno, se requieren informaciones del terreno que no suelen estar disponibles a esta escala. Por esta razón, en el presente estudio se busca aplicar un modelo físico con base en informaciones que, a esta escala, sean fácilmente accesibles, tales como datos de lluvia, unidades litológicas y los usos y cubiertas del suelo.

En términos de gestión del territorio, la representación de la susceptibilidad se pueden destacar dos aspectos importantes: las unidades de terreno computacionales y las de zonificación, aunque las unidades de cálculo y las unidades de mapas no tienen por qué ser necesariamente las mismas (Calvello et al., 2013). En estos casos se requieren criterios de agrupación para definir una única clase de susceptibilidad para la unidad territorial de zonificación en base a los resultados calculados en las unidades computacionales.

En la literatura se disponen de diversas posibilidades de unidades de terreno de zonificación tales como las llamadas “*slope units*” en inglés, o unidades de ladera, las unidades de cuadrícula, las unidades hidrográficas etc. En este sentido, las unidades de ladera son consideradas las unidades más adecuadas (Alvioli et al., 2016). Sin embargo, en la actualidad los programas libres disponibles para su generación son de difícil uso.

Por otro lado, las cuencas y medias cuencas hidrográficas pueden ser generadas por software libre, necesitando apenas un modelo digital de elevaciones (MDE).

En este estudio, se busca estimar la susceptibilidad de deslizamiento para un caso real, comparando diversas posibilidades de unidades de terreno y criterios de agrupación.

La zona a estudiar tiene 405 km² y se encuentra ubicada en el Montseny, un parque natural ubicado en Catalunya, para la cual se pretende calcular la susceptibilidad de deslizamientos superficiales desencadenados por lluvias. Como precipitación de referencia se tiene la precipitación acumulada durante la borrasca Gloria, fenómeno que afectó a más de la mitad de los municipios de Catalunya (Ramon Suñé, 2020).

1.2. Objetivos del trabajo

En el presente estudio se busca emplear un modelo de tipo físico adecuado para un área de 405 km² para calcular la susceptibilidad de deslizamientos superficiales desencadenados por lluvias, teniendo como lluvia del evento las precipitaciones acumuladas durante la borrasca Gloria. El objetivo es categorizar la susceptibilidad de deslizamientos con base en la probabilidad de rotura calculada para los píxeles de cinco metros de lado. Para obtener los datos de entrada en el formato adecuado para utilizar el modelo, se busca usar herramientas y procedimientos propios de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para transformar la información disponible.

Una vez que se obtengan las susceptibilidades de deslizamientos se pretende evaluar la distribución de probabilidades de rotura por toda la zona de estudio e identificar las zonas más susceptibles de acuerdo con los resultados.

Por otra parte, se analizan diferentes posibilidades de unidades de terreno, tanto con medias cuencas como con cuencas hidrográficas enteras. A continuación, se pretende estudiar la distribución de tamaños de los polígonos en toda la zona de estudio.

Una vez definidas las unidades territoriales más adecuadas, se propondrá diferentes criterios de agrupación para clasificar el mapa. Finalmente, se aspira a definir el criterio más adecuado para el caso en estudio teniendo en cuenta la distribución de susceptibilidad en los píxeles y el inventario de deslizamientos de carreteras.

2. ANTECEDENTES EN LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS

Un deslizamiento es una amenaza natural y un proceso activo que contribuye para la erosión y evolución del paisaje. Este tipo de evento puede ser desencadenado por varios factores. Sus causas pueden estar asociadas tanto a cambios meteorológicos o a fenómenos sísmicos, como a intervenciones humanas (Guzzetti et al., 2005). Además, un mismo fenómeno puede generar más de un deslizamiento (Froude & Petley, 2018).

Evaluación de la Susceptibilidad de Deslizamientos

Varios métodos han sido propuestos para evaluar de forma cuantitativa el riesgo de deslizamientos a escala de cuenca hidrográfica. Algunos de ellos fueron clasificados como modelos de susceptibilidad una vez que estos podrían predecir los locales donde los deslizamientos podrían ocurrir (Guzzetti et al., 2005).

La susceptibilidad de deslizamientos puede ser interpretada como una tendencia de una región en generar deslizamientos (Guzzetti et al., 2006). Sin embargo, según Sun et al., (2018), la susceptibilidad de deslizamientos apenas considera la probabilidad de que los factores desencadenantes de los deslizamientos ocurran sin tener en cuenta su período de retorno y los procesos de inestabilidad asociados.

Para estimar la susceptibilidad de deslizamientos se disponen de cuatro tipos de modelos: los subjetivos, basados en la experiencia de expertos (“expert-based models”), los modelos físicos, los modelos estadísticos y los denominados “machine learning models” (Medina et al., 2021).

Los modelos de tipo físico para el cálculo de susceptibilidad son capaces de considerar las propiedades geotécnicas del suelo en el cálculo e incorporan las hipótesis hidrológicas en el análisis de estabilidad de taludes infinitos (Medina et al., 2021).

La representación de los resultados de los análisis de susceptibilidad se da a través de mapas, los cuales describen la distribución espacial de la probabilidad de que ocurra un deslizamiento. Estos mapas suelen estar orientados a la gestión del territorio una vez que permiten identificar las zonas donde futuros eventos son más probables (Fell et al., 2008).

Sin embargo, debido a la dificultad de obtener información sobre las múltiples variables que pueden desencadenar un deslizamiento, en escala regional y en alta resolución, se emplean modelos con base en modelos digitales de elevación y, en algunos casos, con base en información geológica y de usos del terreno (Palau et al., 2020).

Representación Cartográfica de la Susceptibilidad

En la literatura se encuentran diversas propuestas de unidades de mapa tales como polígonos, líneas o píxeles (Palau et al., 2020). En este sentido, la elección de subdivisión territorial a utilizar no es obvia y es clave para el mapeamiento correcto y racional de la susceptibilidad de deslizamiento (Sun et al., 2020).

Una UT (unidad de mapa o unidad de terreno, en traducción libre del inglés “Terrain Mapping Unit”) representa un dominio, en el cual se maximicen la homogeneidad interna y la heterogeneidad externa. Según Calvello et al. (2013), la elección de la mejor UT a emplearse dependerá de una variedad de factores tales como el tipo de deslizamiento a estudiar, la escala, la resolución, la calidad y el propósito del mapa, bien como de la información y recursos disponibles.

Según (Calvello et al., 2013), para la definición de la UT son relevantes tanto los aspectos de zonificación como los aspectos computacionales. Por esta razón se definen dos tipos de unidades territoriales. La primera, se refiere a la unidad de terreno computacional (TCU, del inglés “Terrain Computational Unit”), mientras que la segunda es la unidad de terreno de zonificación (TZU, es decir, “Terrain Zoning Unit”). La distinción entre estas dos unidades se justifica una vez que en los análisis geoestadísticos la unidad computacional (asociada a la resolución espacial) y la unidad de zonificación (asociada a la “resolución informativa”) no deben ser necesariamente iguales.

De acuerdo con Rossi et al., (2010), como unidades de terreno suelen emplearse cinco tipos de categorías: unidades de cuadrícula o rejilla (“grid units”, en inglés), unidades de pendientes (“slope units”), unidades de terreno (“terrain units”), unidades de condición única (“unique condition units”) y las unidades hidrográficas (“watershed units”).

En la literatura las unidades de cuadrícula suelen ser las unidades más ampliamente empleadas en los mapas de susceptibilidad (Sun et al., 2018), debido a la simplicidad de utilizar cuadrículas regulares (píxeles) con las unidades del modelo digital de elevación.

Por otro lado, las unidades de pendientes discretizan el terreno en unidades hidrológicas recortadas por millares de pequeñas unidades divididas por las líneas de valle y de cresta (Sun et al., 2020). Su forma es irregular, de modo a maximizar la homogeneidad geomorfológica dentro de la unidad y la heterogeneidad con las unidades adyacentes. Estas unidades de pendientes son conocidas como las más apropiadas para la discretización del terreno en los mapas de susceptibilidad. Si por un lado estas unidades son ventajosas, una vez que se correlacionan con la topografía, no se disponen de criterios objetivos para su delimitación (Alvioli et al., 2016).

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro del parque natural de Montseny y su área pertenece a las comarcas de Osona y Vallès Oriental de la provincia de Barcelona y la comarca de Selva, en la provincia de Girona, Catalunya, España (Figura 3.1 y Figura 3.2).



Figura 3.1. Zona de estudio: ubicación (Google LLC, 16/06/2021).

La zona de estudio del presente trabajo tiene un área total de 405 km^2 y sus coordenadas son las que se indican en la Tabla 3-1.

La geología local de Montseny se reparte en dos zonas muy distintas. La primera conformada por materiales ígneos y metamórficos y la segunda por rocas sedimentarias de las eras mesozoica y cenozoica (DIBA, 2021).

El clima de la zona de estudio es mediterráneo. Los valores máximo y mínimo de precipitaciones medidos en 2019 en las comarcas contempladas por el área de estudio fueron resumidos en la Tabla 3-2. A través de esta última, se observa que las mayores precipitaciones ocurrieron en los meses de septiembre y octubre. Mientras que las épocas más secas, en los meses de enero y febrero.

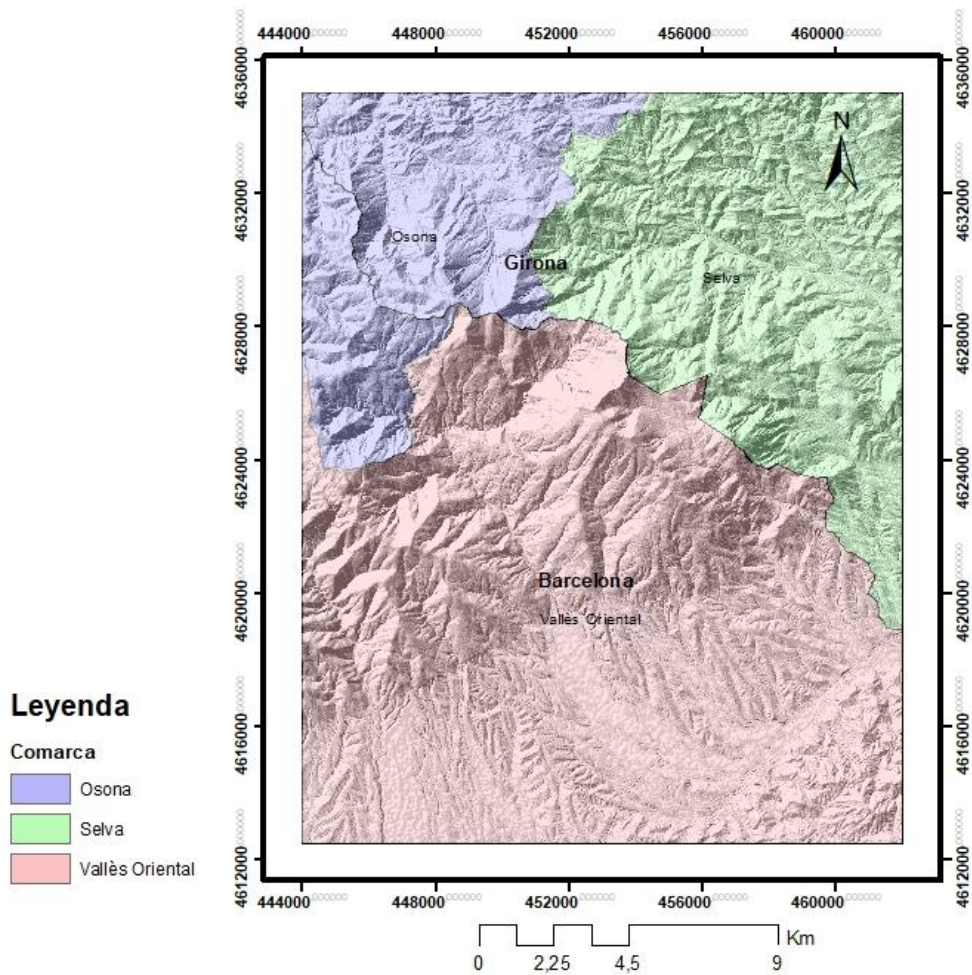


Figura 3.2. Comarcas y Provincias de la Zona de estudio.

Tabla 3-1 Coordenadas de la zona de estudio

ETRS 1989 UTM (Zona 31N) / EPSG 25381	
Izquierda	444.002,5 m
Derecha	462.002,5 m
Arriba	4.635.002,5 m
Abajo	4.612.502,5 m

Tabla 3-2. Precipitaciones máximas y mínimas en 2019 (ICGC, 2019)

Comarca	Precipitación máxima mensual (mm)	Precipitación mínima mensual (mm)
Osona	100,5 – Septiembre	2,4 – Febrero
Vallès Oriental	104,7 – Octubre	1,0 – Febrero
Selva	109 – Octubre	1,3 – Febrero

Las temperaturas máxima y mínimas medidas en 2019 fueron resumidas en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Temperaturas máximas y mínimas en 2019 (ICGC, 2021a)

Comarca	Temperatura máxima mensual (°C)	Temperatura mínima mensual (°C)
Osona	33,5– Julio	-2, 8 – Enero
Vallès Oriental	31,4 – Julio	-0,9 – Enero
Selva	33,1 – Agosto	-1,9 – Enero

La zona de estudio presenta dos orografías muy distintas. Más al noroeste se observa un relieve más accidentado y más al sur se tiene un relieve más plano. Sus principales montañas Turó de l’Home (Vallès oriental), les Agudes (Selva – Vallès Oriental) y Matagalls (Osona – Vallès Oriental) presentan altitudes máximas de 1.706 m, 1.705 m y 1.697 m, respectivamente. Las cuencas hidrográficas principales son las cuencas del Río Congost, la Tordera y la Riera Major.

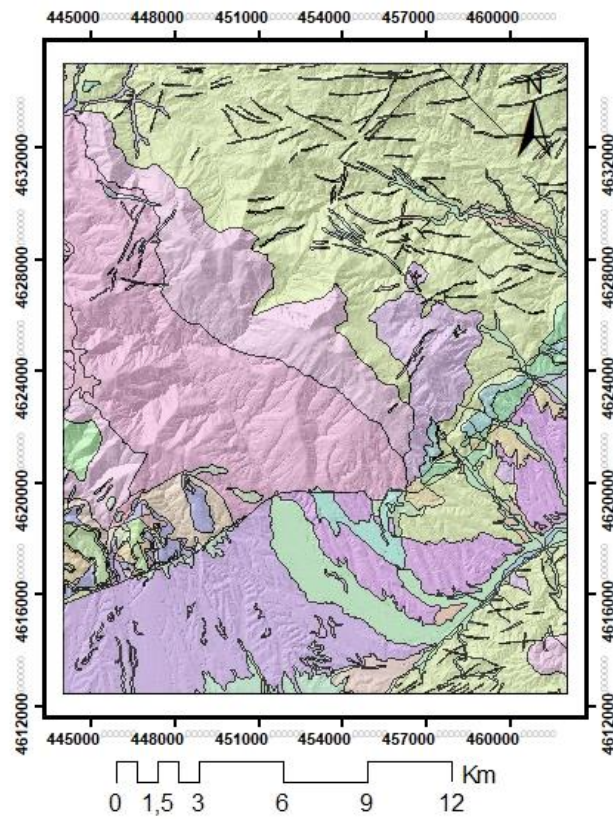
Según (DIBA, 2021), la vegetación de Montseny presenta formaciones características del mediterráneo en las partes bajas (alcornoques, encinares y pinares) y en su porción más montañosa, encinar montañoso y robledales. Las diferencias de humedad y temperatura explican la vegetación que se desarrolla en el Montseny. A modo de “pisos”, y a la vez que se gana en altura, se reproducen las formaciones vegetales características del mediterráneo en las partes bajas (encinares, alcornoques y pinares), en la montaña mediana lluviosa, (encinar montañoso y robledales), con ambientes centroeuropeos por encima de los 1.000 m (hayas y abetos) e, incluso, con ambientes subalpinos y en las cimas (matorrales y prados que los culminan).

3.2. Datos disponibles

En el presente estudio se utilizó la siguiente información digital y georreferenciada:



- Mapa de geología del “Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya” (ICGC) con escala 1:50.00 (ICGC, 2021b) que se muestra en la Figura 3.3.
- Inventario deslizamientos en carreteras durante la Borrasca Gloria del ICGC (ICGC, 2021b), EPSG 2831.
- Mapa de precipitaciones mensuales promedio de enero en milímetros observadas en los últimos 30 años (GENCAT, 2021).
- Mapa de usos y cubiertas del suelo con píxeles de 30 metros del año 2009 (CREAF, 2020).
- Modelo Digital de Elevación (ICGC) con píxeles de 5 metros y unidades en metros. EPSG 25831 (ICGC, 2021b).
- Mapa de precipitaciones acumuladas durante el temporal Gloria (mm) del CRAHI (“Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia”), obtenido mediante radar meteorológico, con píxeles de 1000 metros. EPSG 25831.



Leyenda

Unidades geológicas









































 Capl	 Gpg	 Qt1
 Caps	 NMa	 Qt2
 Dc	 NMlag	 Qt3
 Fap	 NMlog1	 Qv2
 Fbc	 NMoga	 Qv3
 Fdq	 NMgc	 SDc
 Fgd	 Orp	 Sf
 Fgfm	 PEogr	 mc_Orp
 Fla	 PEgc	 mc_ÇOrp
 Fmg	 POa	 mrc_ÇOrp
 Fmm	 PPEa	 mrc_ÇOrp
 Fps	 Q	 ÇOrp
 Fq	 Qec	
 Ggd	 Qep	
 Gl	 Qg	
 Gng	 Qr	
 Gp	 Qt0-1	

Figura 3.3. Mapa de geología del ICGC, escala 1:50.000 de la zona de estudio (ver la descripción de la leyenda en el Anejo 1).

4. METODOLOGÍA

El presente estudio se dividió en dos etapas. Una primera en que se calcularon las probabilidades de deslizamientos superficiales encadenados por lluvias y una segunda etapa en que se definieron las unidades de terreno y los criterios de agrupación.

Para la primera parte del estudio, se utilizó uno de los modelos de tipo físico mencionados en el capítulo 2. En especial, se optó por un programa apropiado para cálculos a escala regional: el FSLAM (Medina et al., 2021), sigla en inglés para “*Fast Shallow Landslide Assessment Model*” o “Modelo Rápido de evaluación de deslizamientos de tierra superficiales”, en traducción libre.

Para utilizar el programa, se analizó y se trató la información disponible para que fuera compatible como dato de entrada en el *software*. Una vez realizado el cálculo se obtienen las probabilidades de rotura iniciales y finales. Estos resultados fueron clasificados en cuatro categorías de susceptibilidad: muy baja, baja, media y alta. En continuidad, se compararon los resultados del FSLAM con los puntos del inventario.

La segunda parte del estudio se refiere a la definición de las unidades de terreno a utilizar, bien como de los criterios de agrupación de las clases de rotura. El procedimiento consistió en generar y comparar diferentes opciones de tamaño mínimo para cuencas y subcuencas hidrográficas utilizando el QGIS (Equipo desarrollador QGIS, 2021). Una vez que se definieron las unidades de terreno adecuadas, se procedió a estudiar los criterios más adecuados para la agrupación de los datos de probabilidad de rotura.

En los subcapítulos subsecuentes (secciones 4.1 a 4.4) se explican más en detalle las premisas, procedimientos y herramientas utilizadas en cada una de estas dos etapas del estudio.

4.1. FSLAM

El FSLAM (Medina et al., 2021) es un modelo determinístico para el cálculo de susceptibilidad de deslizamientos desencadenados por lluvias. Este modelo incorpora tanto los aspectos geotécnicos como hidrológicos. Teniendo en cuenta el área de zona de estudio (405 km^2), este modelo puede ser considerado como una alternativa especialmente ventajosa ya que los resultados, aunque a escala regional, se alcanzan en pocos minutos con pocos recursos computacionales. Además, el FSLAM dispone de un código que puede ser utilizado a través de un plugin en software libre de sistema de información geográfica: el QGIS.

4.1.1. Descripción del modelo

En el modelo geotécnico se considera el cálculo de estabilidad con base en la teoría de talud infinito (Lambe & Whitman, 1979) para el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Mientras que las propiedades del terreno se estiman a través de un análisis estocástico.

Se toma la cohesión como la suma de la cohesión efectiva (asociada a la matriz del suelo) y de la cohesión aparente. Esta última tiene en cuenta la contribución de las raíces de la vegetación a la resistencia del terreno frente al deslizamiento.

EL FSLAM también considera, a parte de las propiedades del terreno, el efecto de la lluvia sobre el nivel freático. Este efecto es importante ya que el aumento de las presiones de poros genera una disminución de las tensiones efectivas en el terreno.

Además, para estimar el aumento del nivel freático provocado por una dada precipitación, se tienen como premisas que el flujo lateral ocurre en el medio a largo plazo, mientras que el flujo vertical sucede en un corto plazo (Papa et al., 2013). Estas consideraciones son incorporadas al modelo hidrológico, el cual determina el nivel freático considerando estas dos diferentes estimaciones.

En la primera estimación se tiene en cuenta el flujo lateral asociado a la condición estable del nivel freático y calculado con base en las precipitaciones antecedentes (P_a). Para calcular el caudal de agua efectivo generado por la lluvia antecedente, es decir, descontando la fracción de pérdida debido a los procesos de evaporación y por el “*runoff*”, sería necesario realizar un cálculo de balance de agua en el suelo. Sin embargo, el FSLAM no realiza esta estimación. En sustitución, para representar la infiltración efectiva a largo plazo, las precipitaciones antecedentes son consideradas en unidades de mm/día.

En cambio, el flujo vertical — asociado al proceso de infiltración vertical — es calculado a partir de la precipitación del evento (P_e). Aunque este proceso ocurra en la zona vadosa, el modelo utiliza la hipótesis simplificadora de que, al acercarse la condición de deslizamiento, el suelo estará saturado. De este modo, el modelo no tiene en cuenta el proceso que desencadena el deslizamiento, sino que estima directamente su factor de seguridad.

Por otro lado, para estimar la contribución de la lluvia del evento sobre el nivel freático se utiliza el modelo SCS-CN (USDA, 1986) que apenas requiere un número de curva.

Por lo tanto, la altura final del nivel de agua será la suma de las alturas debido a la precipitación antecedente y debido a la precipitación del evento.

En lo que se refiere a la distribución espacial de los parámetros del terreno, el modelo utiliza una distribución estocástica.

Para el rango de valores estudiado en Medina et al., (2021) se concluyó, tras realizar un análisis de sensibilidad, que el parámetro con mayor influencia sobre los resultados es la cohesión, seguida de la fricción, conductividad hidráulica y espesor de la capa de suelo. Mientras que el modelo es menos sensible a la porosidad, a la densidad y al número de curva. Por otro lado, el FSLAM es más sensible a la lluvia antecedente que a la lluvia del evento.

Por lo tanto, las principales ventajas del modelo se podrían resumir en:

- bajo coste computacional a escala regional y rapidez de cálculo;
- considera las propiedades geotécnicas del terreno;
- considera tanto el flujo subterráneo lateral como el flujo vertical en su modelo hidrológico.

Sin embargo, la principal desventaja de estos modelos de tipo físico está asociada a la incertidumbre de los parámetros del terreno (Medina et al., 2021). En el caso del FSLAM, se deben proporcionar parámetros para los diferentes tipos de suelo, aunque estos parámetros no son conocidos a esta escala. Además, el modelo es relativamente sensible a la cohesión. Por otro lado, al ser un modelo simplificado, no se tiene en cuenta el flujo en tres dimensiones y los estados del terreno durante el proceso que genera el deslizamiento.

4.1.2. Datos de entrada y salida en el FSLAM

Para el plugin del FSLAM en el QGIS, se requiere un tratamiento de la información disponible de modo a que se dispongan como datos de entrada cinco mapas ráster en ficheros con extensión “.asc” — del inglés “Action Script Communication” —y dos tablas en formato “.csv” (“Comma Separated Values”). La Tabla 4-1 presenta un resumen de archivos de entrada necesarios.

Tabla 4-1. Datos de entrada en el FSLAM

Nombres de los ficheros de entrada	Descripción
Dem.asc	Modelo Digital de Elevación
Soil.asc	Mapa con la distribución de los tipos de suelos
Htmu.asc	Mapa con la distribución de los tipos de usos del suelo
rain_event.asc	Lluvia antecedente en mm/día
rain_event.asc	Lluvia del evento en mm
soil.csv	Tabla de propiedades del suelo
htmu.csv	Tabla de tipos de unidades hidrológico-mecánicas.

Cabe destacar que todos los mapas deben presentar las mismas características en cuanto a:

- Tamaño de pixel (“Cell size”, en inglés);
- Envoltente;
- Código EPSG (“European Petroleum Survey Group”);
- Formato de números y precisión de campos;
- Valor “No Data”: -9999.

Para adecuar la información disponible a los requisitos del código del FSLAM, se emplearon herramientas de sistemas de información geográfica. A continuación, se describen los procedimientos utilizados para obtener los datos de entrada en el modelo.

Con base en la información disponible descrita en el apartado 3.2, se optó por utilizar el tamaño de píxel igual a cinco metros, es decir, la misma del Modelo Digital de Elevación. Una vez definida el tamaño de píxel a utilizar, se definió el polígono de contorno del área de estudio de modo que su envolvente tuviera coordenadas con valores múltiples del tamaño de píxel de 5 metros.

Teniendo en cuenta que se tomó como referencia el tamaño de píxel del Modelo Digital de Elevación, apenas fue necesario recortarlo para que tuviera la misma envolvente que la zona de estudio.

Para obtener el mapa de unidades litológicas (“soil.asc”), se utilizó el mapa de geología de Catalunya en formato “*shapefile*” mencionado en el apartado 3.2. Para ello, se recortó el mapa de modo a obtener la misma envolvente del mapa de la zona de estudio. Una vez recortado, se exportó su tabla de atributos. En el Excel, se añadió una columna de clases litológicas con cinco posibilidades: aluvión, coluvión, roca metamórfica, roca sedimentaria o roca ígnea. En continuidad, se creó un campo de valores para asociar un valor numérico a cada una de estas clases. Entonces, se vinculó su tabla de atributos a la nueva tabla de categorías. La etapa siguiente consistió en transformar el archivo “*shapefile*” en mapa ráster utilizando como valor el campo con el número de cada clase litológica.

El mapa resultante a ser utilizado en el FSLAM se muestra en la Figura 4.1. Se observa que en la porción oeste de la zona con relieve más accidentado se tiene una predominancia de rocas sedimentarias. Por otro lado, más al nordeste de la figura y más al sur, predominan las rocas ígneas y los aluviones, respectivamente.

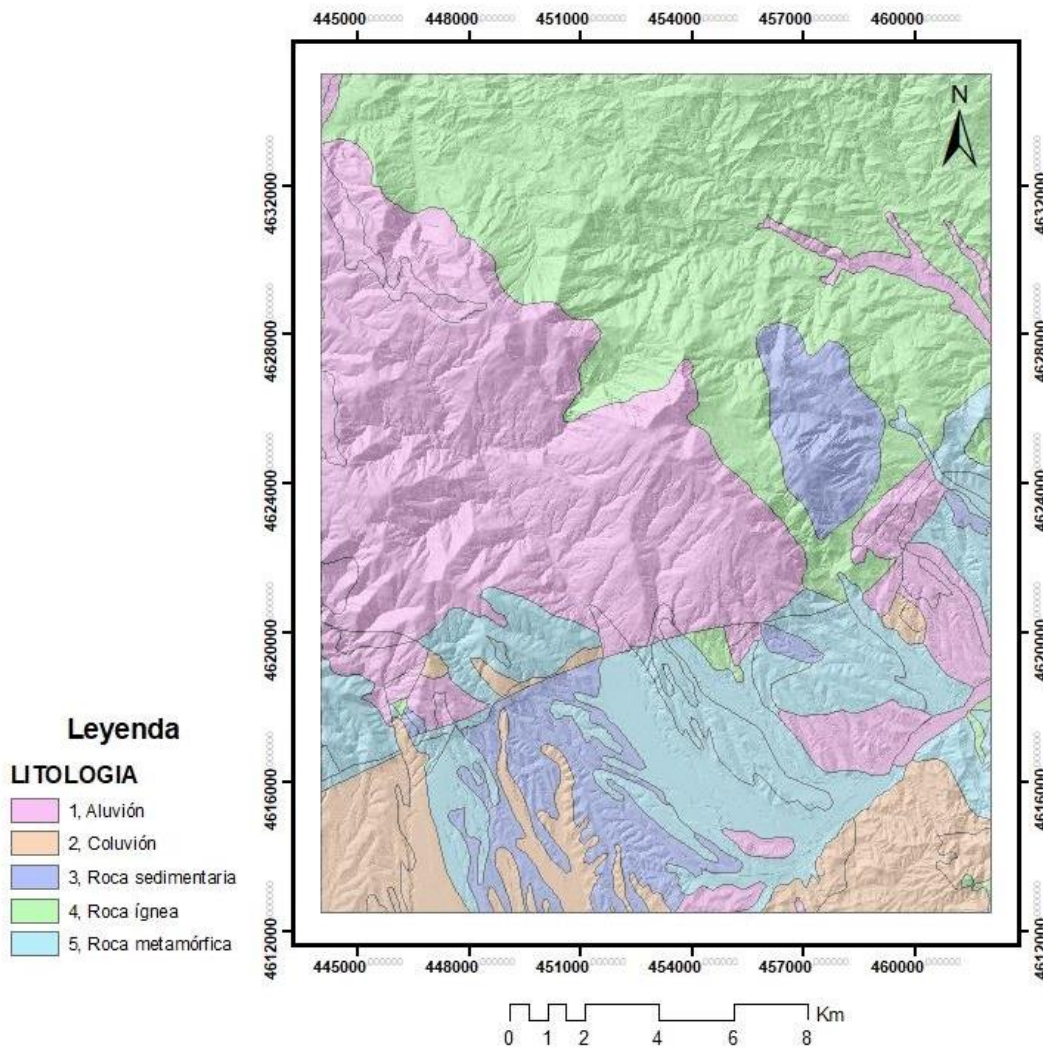


Figura 4.1. Mapa ráster de litologías reclasificadas.

Una vez realizada la simplificación de unidades litológicas, se elaboró la tabla “Soil.csv”, la cual atribuye las propiedades geotécnicas a las unidades litológicas de la Figura 4.1. A falta de información geotécnica disponible a esta escala, se arbitraron sus propiedades con los valores que se indican en la Tabla 4-2.

Por otro lado, para el mapa de usos y cubiertas del suelo, tras el recorte, se empleó una herramienta de remuestreo para reducir el tamaño del pixel de 30 a 5 metros (mismo tamaño del pixel del Modelo Digital de Elevación). Posteriormente, se reclasificó el mapa ráster, para obtener una clasificación continua con valores de 1 a 9, tal y como se indica en Figura 4.2.

Tabla 4-2. Propiedades geotécnicas adoptadas.

Clase Litológica	K	$c_{m\acute{a}x} / c_{m\acute{i}n}$	$\varphi_{m\acute{a}x} / \varphi_{m\acute{i}n}$	h	ρ	n	HSG
()	(m/s)	(kPa)	(grados)	(m)	kg/m ³	(m ³ /m ³)	()
Aluvión	1,00E-03	3 / 0	45 / 35	4	2000	0.3	A
Coluvión	1,00E-06	3 / 0	35 / 35	1.5	2000	0.3	B
Roca sedimentaria	1,00E-05	5 / 0	35 / 35	1	2000	0.35	A
Roca ígnea	1,00E-05	4 / 0	35 / 35	1	2000	0.35	A
Roca metamórfica	1,00E-06	5 / 0	35 / 20	1	2000	0.35	B

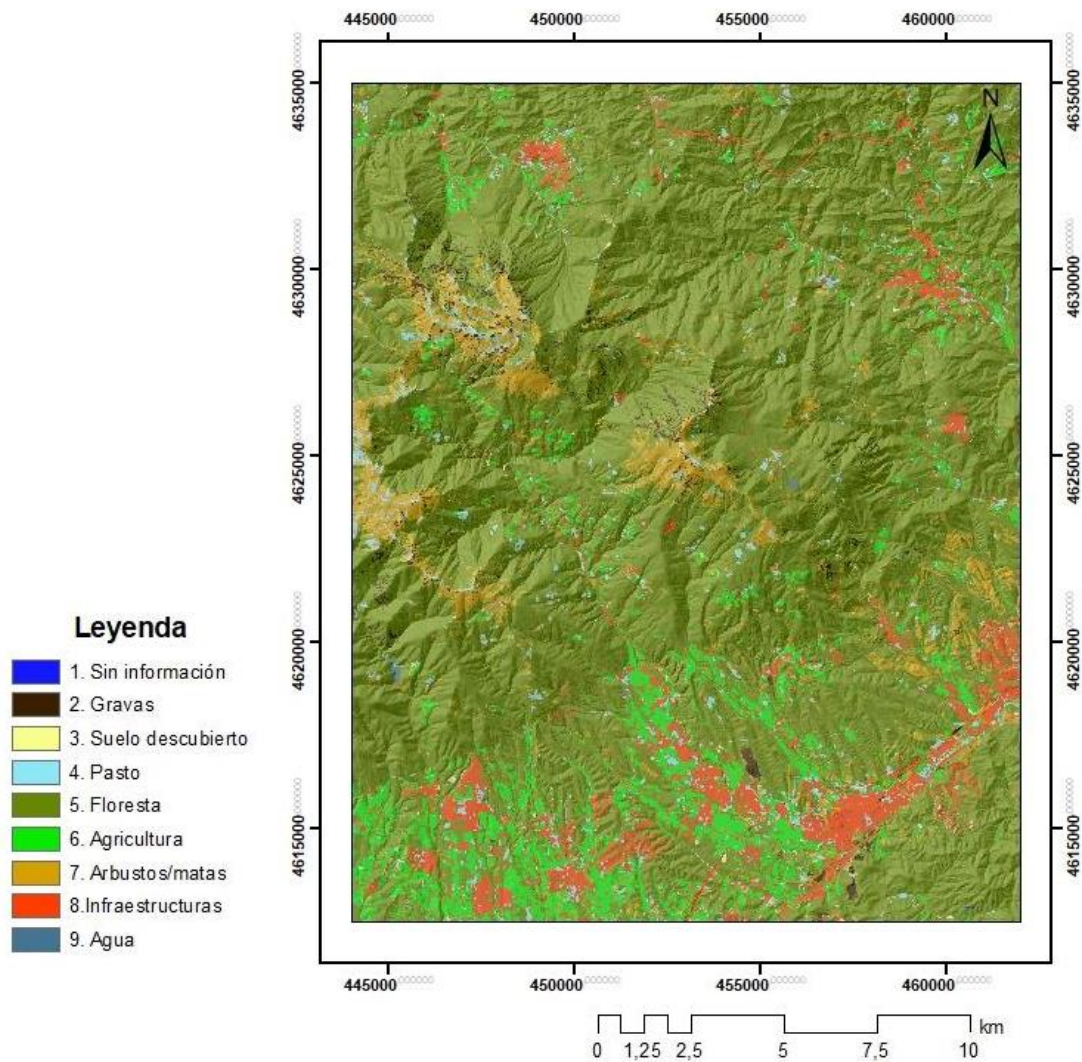


Figura 4.2. Mapa ráster de usos y cubiertas del suelo reclasificado para el FSLAM.

Las clases de usos y cubiertas del suelo permiten atribuir la cohesión aparente y a los números de curvas. Así como las propiedades geotécnicas de la Tabla 4-2, la cohesión aparente y los números de curvas fueron arbitrados (ver Tabla 4-3). Sin embargo, no se realizó un estudio para calibración de estos valores.

Tabla 4-3. Cohesión y Números de curva para clases de usos y cubiertas de suelo.

LULC	$C_{r\text{máx}}/$ $C_{r\text{mín}}$	CN-A	CN-B	CN-C	CN-D
()	(kPa)	(-)	(-)	(-)	(-)
1.Sin información	999 / 999	100	100	100	0
2.Gravas	0 / 0	30	30	30	30
3.Suelo descubierto	0 / 0	90	92	96	98
4.Pasto	3 / 0	56	68	80	84
5.Bosque	14 / 4	49	69	79	84
6.Agricultura	10 / 0	43	65	76	82
7.Arbustos/matas	6 / 3	36	60	73	79
8.Infraestructuras	1 / 0	60	75	85	90
9.Agua	999 / 999	100	100	100	0

El procedimiento de remuestreo también fue necesario para el mapa de lluvias del evento. Por lo que, una vez recortado el mapa, se realizó una transformación del tamaño de sus píxeles de 1.000 metros a 5 metros. Al tener unidades en mm, no se realizó ninguna transformación de unidades. El mapa final, con la lluvia del evento se muestra en la Figura 4.3.

Ya para el mapa de lluvias antecedente, originalmente con extensión “.shp”, se tienen polígonos con diferentes rangos de precipitación asignados. Sin embargo, el modelo requiere mapas con valores numéricos. Por esta razón, se exportó la tabla de atributos al Excel, en el cual se calcularon los valores promedios para cada rango. A continuación, se vinculó la tabla de atributos original a la tabla con los valores promedios.

Además, al ser originalmente un mapa de polígonos, se realizó una transformación de polígonos a líneas. Con el mapa de líneas, se generó un TIN (sigla para “*triangular irregular network*” o red de triangulación irregular, en traducción libre) tomando sus líneas como “*Softlines*” (o líneas suaves, en castellano). Una vez creado el TIN, se transformó el mapa a ráster.

Teniendo en cuenta que el mapa de lluvia antecedente presenta datos de lluvia del promedio mensual de los últimos 30 años para el mes de enero, mientras que el FSLAM requiere unidades en mm/día, se utilizó una calculadora ráster con el objetivo de obtener un valor promedio diario. Es decir, se dividieron sus valores por 31 días. Finalmente, para tener en cuenta las pérdidas

por procesos tales como la evapotranspiración y por el “*runoff*”, se consideró que apenas un tercio de la lluvia antecedente se incorpora al flujo subterráneo. El mapa de lluvias antecedente adaptado al FSLAM y con valores de precipitaciones en mm/día se muestra en la Figura 4.4.

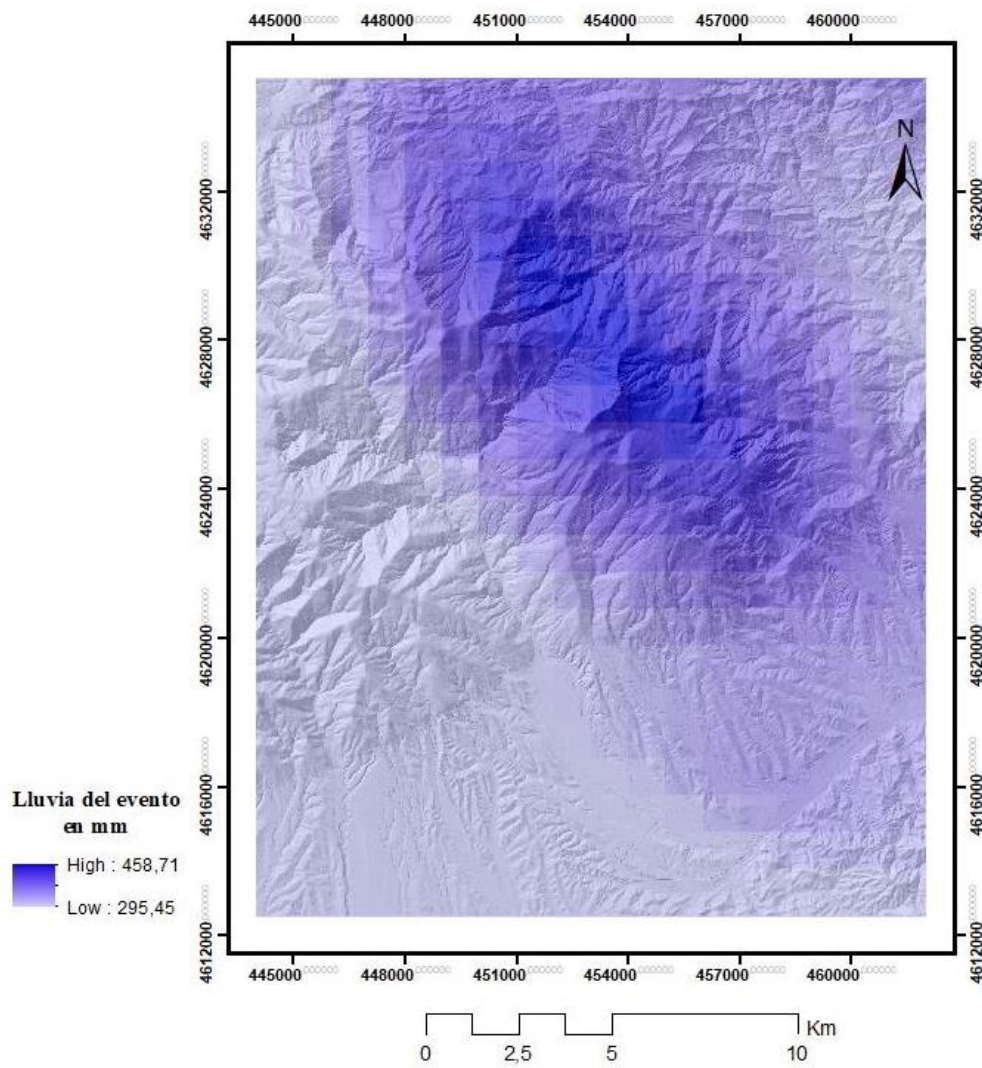


Figura 4.3. Mapa de lluvia del evento, precipitaciones en mm.

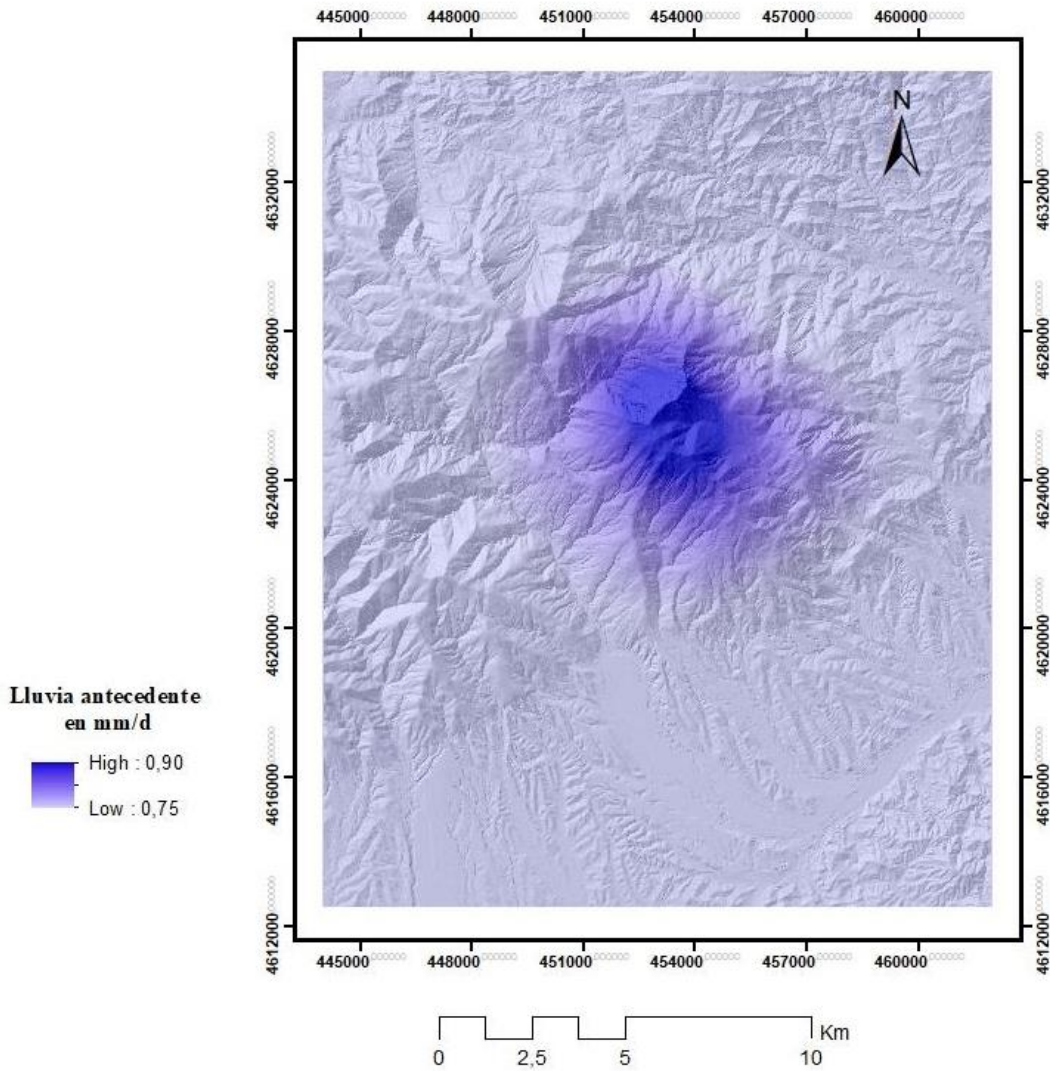


Figura 4.4. Mapa ráster con la distribución pluviométrica media antecedente en mm/día.

Entre los posibles datos de salida del FSLAM, se estudiaron apenas los resultados en formato “asc” de probabilidades de rotura (POF) iniciales y finales, es decir, anteriores y posteriores al evento.

Una vez que se obtuvieron los mapas con el POF final en cada píxel, estos fueron reclasificados de modo a obtener cuatro clases de susceptibilidad con el criterio de clasificación de la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Clasificación de la probabilidad de rotura.

Valor de POF en el pixel	Clase de Susceptibilidad	Número identificador de la clase
0 - 0,15	Muy baja	1
0,15 -0,50	Baja	2
0,50 – 0,80	Alta	3
0,80 – 1,0	Muy alta	4

4.2. Unidades del terreno

En este estudio fueron consideradas dos opciones de unidades de terreno: las cuencas y medias cuencas hidrográficas. Para generar estas unidades, se utilizó el software GRASS GIS 7.8.5 sigla para “*Geographic Resources Analysis Support System*”. La elección de esta herramienta se basó en que a través de esta se pueda generar cuencas y medias cuencas apenas con base en el modelo digital de elevación y con la definición de su tamaño mínimo. Este último parámetro especifica el tamaño mínimo de la cuenca hidrográfica contado en número de píxeles en los casos en que no se utilice un mapa de flujo como dato de entrada (GRASS Development Team, 2021).

Los resultados del GRASS pueden tener como salida un mapa ráster con el formato “GeoTIFF”.

Se consideraron dos posibles flujos de trabajo y se comparó ambos resultados. En el primero se utilizó el modelo digital de elevación no recortado, se generaron las cuencas o media-cuencas y luego se recortó el mapa resultante con el polígono del área de estudio. Mientras que, en el segundo caso, se utilizó un mapa ya recortado como dato de entrada en el GRASS.

Teniendo en cuenta que las áreas de las unidades territoriales son un aspecto relevante del análisis, se crearon mapas con diferentes tamaños de cuencas utilizando como cantidades mínimas de píxeles: 1000, 750, 500, 250 y 100 mil píxeles. Una vez obtenidos los mapas ráster con las cuencas, estas fueron transformadas a polígonos. Teniendo en cuenta que al tener unidades de terreno que dependen de la topografía local se tendrán unidades con tamaños diversos, se estudió su distribución de áreas, y sus áreas mínimas, máximas y promedias de cada opción.

Para seleccionar las unidades de terreno más adecuadas, los resultados fueron comparados con la Demarcación Hidrográfica de Cuencas Internas y red de flujo de Catalunya, descargadas del Catálogo Nacional de Reservas Hidrológicas.

Finalmente, tras evaluar las diversas opciones y tamaños de unidades de terreno, se eligieron aquellas unidades más adecuadas teniendo en cuenta su morfología, geometría y correspondencia con el modelo hidrológico.

4.3. Criterios de agrupación

Debido al gran número de pruebas a realizar, los criterios de agrupación fueron estudiados con base en los resultados finales de probabilidades de rotura.

Una vez definidas las posibles unidades de terreno más adecuadas, se estudiaron dos grupos de criterios de agrupación. Con el primer grupo se probaron criterios estadísticos para definir la susceptibilidad de cada cuenca con base en la media, mediana y media ponderada de todos los píxeles con probabilidad de rotura dentro de cada unidad. Teniendo en cuenta que la susceptibilidad no debería depender del tamaño de la cuenca, se propusieron cinco diferentes criterios para considerar el contaje absoluto o el porcentaje de los píxeles de cada clase de susceptibilidad.

Para calcular los estadísticos de cada polígono se utilizó la herramienta “*Zonal Statistics as Table (Spatial Analyst)*” de ArcGIS teniendo como datos de entrada el mapa ráster con datos POF para cada píxel, y el mapa de cuencas como mapa para definir las zonas. Esta herramienta en el ArcGIS está limitada para el cálculo de la mediana sobre valores decimales por zonas, por lo que se multiplicó el mapa ráster por mil para trabajar con valores enteros antes de realizar el cálculo.

Para obtener la agrupación con medias ponderadas de susceptibilidad se trabajó con los píxeles previamente agrupados en cuatro clases: muy baja (1), baja (2), media (3) y alta (4). Para ello se reclasificó el mapa POF final, en cuatro nuevos mapas ráster denominados N1, N2, N3 y N4. De modo que el mapa N1 tenía únicamente píxeles de la clase de susceptibilidad 1 o muy baja y los demás píxeles, con el valor “No Data”. El mismo procedimiento se utilizó para los mapas N2; N3 y N4, que apenas conservaron los valores 2, 3 y 4, respectivamente. La Figura 4.5 ilustra este proceso.

Como salida, se tienen tablas con la cantidad de píxeles separada por clases y unidad territorial. A partir de entonces, se calculó la media ponderada. Los resultados fueron adjuntados a la tabla de atributos del polígono con las unidades territoriales. Finalmente, para la simbología, se utilizó el criterio correspondiente al indicado en la Tabla 4-4.

Ya para el segundo grupo de criterios, se utilizaron las tablas resultantes del flujo de trabajo de la Figura 4.5. Con base en el contaje de píxeles por clase se establecieron cinco nuevos criterios, denominados de “A” a “E” descritos en la Tabla 4-5 y en la Tabla 4-6.

Tabla 4-5. Criterios de agrupación propuestos: A, B y C.

Clase de susceptibilidad	Criterio A	Criterio B	Criterio C
4 - Alta	$N4 > 40$	$N4 > 10$	$N4 > 2500$
3 - Media	$N4 \leq 40$ y $N3 > 500$	$N4 \leq 10$ y $N3 > 500$	$N4 \leq 2500$ y $N3 > 500$
2 - Baja	$N4 \leq 40$, $N3 \leq 500$ y $\%N2 > 20\%$	$N4 \leq 10$, $N3 \leq 500$ y $\%N2 > 20\%$	$N4 \leq 2500$, $N3 \leq 500$ y $\%N2 > 5\%$
1 - Muy baja	$N4 \leq 40$, $N3 \leq 500$ y $\%N2 \leq 20\%$	$N4 \leq 10$, $N3 \leq 500$ y $\%N2 \leq 20\%$	$N4 \leq 2500$, $N3 \leq 500$ y $\%N2 \leq 5\%$

Tabla 4-6. Criterios de agrupación propuestos: D y E.

Clase de susceptibilidad	Criterio D	Criterio E
4 - Alta	$N4 > 1200$	$\%N4 > 4\%$
3 - Media	$N4 \leq 2500$ y $(N3 + N4) > 1200$	$\%N4 \leq 4\%$ y $\%(N3 + N4) > 2\%$
2 - Baja	$N4 \leq 2500$, $(N3 + N4) \leq 1200$ y $\%N2 > 5\%$	$\%N4 \leq 4\%$, $\%(N3 + N4) \leq 2\%$ y $\%N2 > 1\%$
1 - Muy baja	$N4 \leq 2500$, $(N3 + N4) \leq 1200$ y $\%N2 \leq 5\%$	$\%N4 \leq 4\%$, $\%(N3 + N4) \leq 2\%$ y $\%N2 \leq 1\%$

En las tablas de criterios de agrupación, las variables N1, N2, N3, N4 representan el conteo de píxeles de clase 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Mientras que $\%N2$, $\%N4$ y $\%(N3 + N4)$, representan los porcentajes de píxeles de clases de tipo 2, porcentajes de clase 4 y la suma de porcentaje de clases de tipo 3 y 4 respecto al total de píxeles de la unidad territorial.

Finalmente, en una plantilla Excel, se asignó un campo para cada criterio. Los resultados para cada criterio se asociaron al mapa de polígonos con las unidades de terreno.

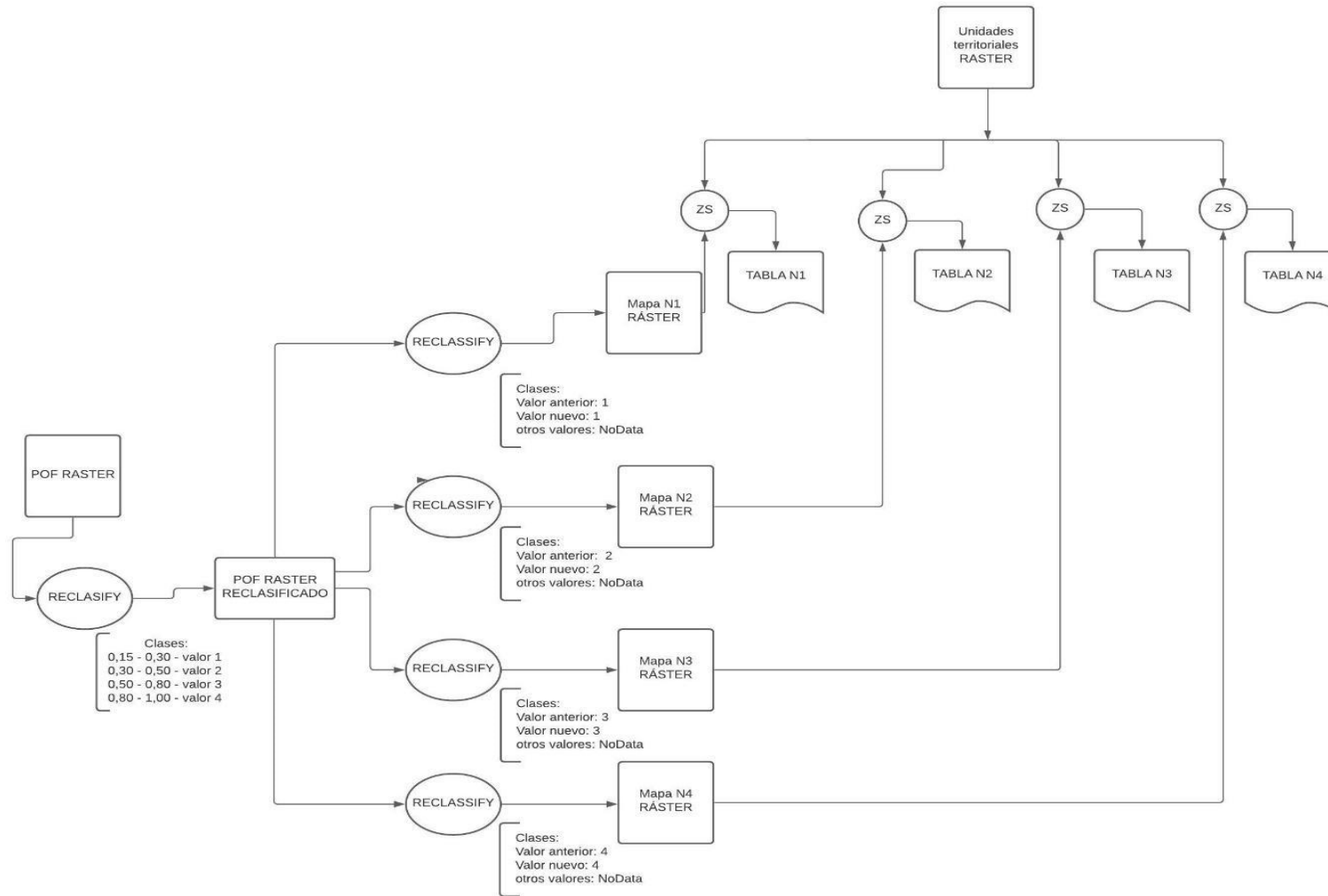


Figura 4.5. Flujo de trabajo para obtener la cantidad de pixeles cada clase de susceptibilidad en una unidad territorial. ZS representa la herramienta “Zonal Statistics as Table (Spatial Analyst)”.

5. RESULTADOS

5.1. FSLAM

En el FSLAM, como posible dato de salida, se tienen las probabilidades de rotura iniciales — es decir, considerando apenas la lluvia antecedente — y finales (considerando tanto la lluvia antecedente como la de la borrasca Gloria). La Figura 5.2 y Figura 5.3 muestran estos resultados con los puntos del inventario superpuestos. Se observa en dichas figuras que los píxeles con mayor valor de POF se concentran principalmente en las zonas de relieve más accidentado. Sin embargo, en las zonas más llanas, se tiene la predominancia de probabilidades de roturas inferiores a 0,15.

Para apreciar el incremento de probabilidad de rotura antes y después del evento, la Figura 5.1 muestra el porcentaje de cantidad de píxeles con un determinado rango de diferencia entre las probabilidades de rotura final e inicial, respecto al total de píxeles de la zona de estudio. Observando esta figura se tiene que la mayoría de píxeles (88,66 %) presenta incrementos inferiores a 0,05.

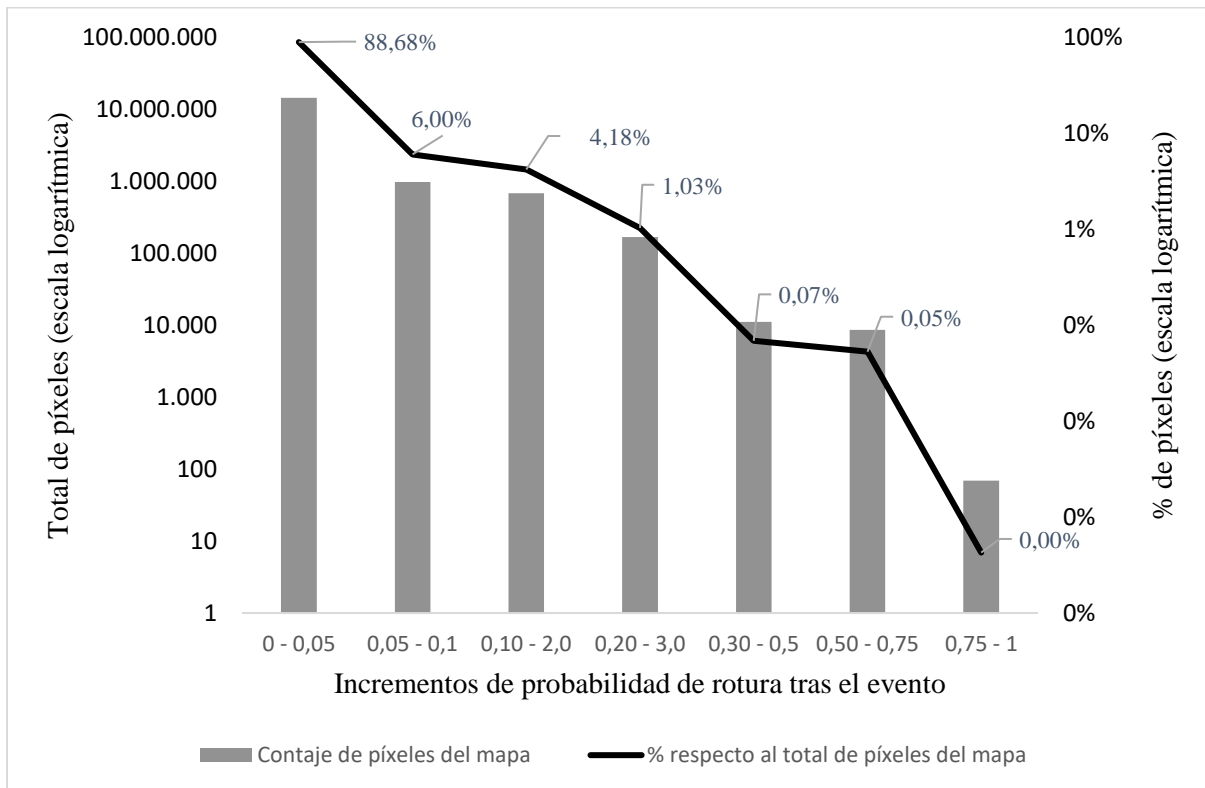


Figura 5.1. Histograma de incrementos de probabilidad de rotura tras el evento.

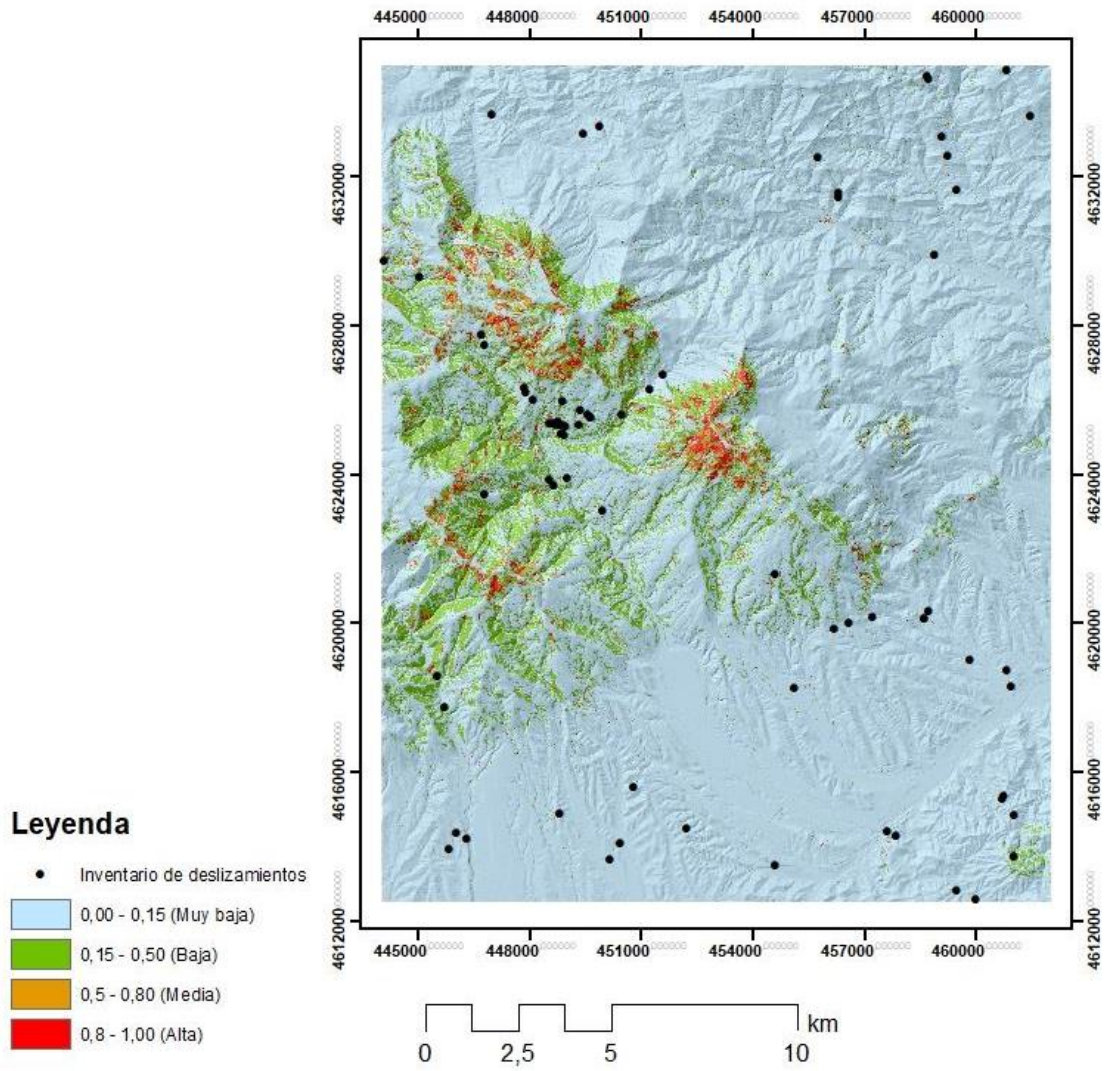


Figura 5.2. Probabilidades de rotura iniciales calculadas con el FLSAM. Escala 1:150.000. Los puntos en color negro representan los puntos del inventario de deslizamientos.

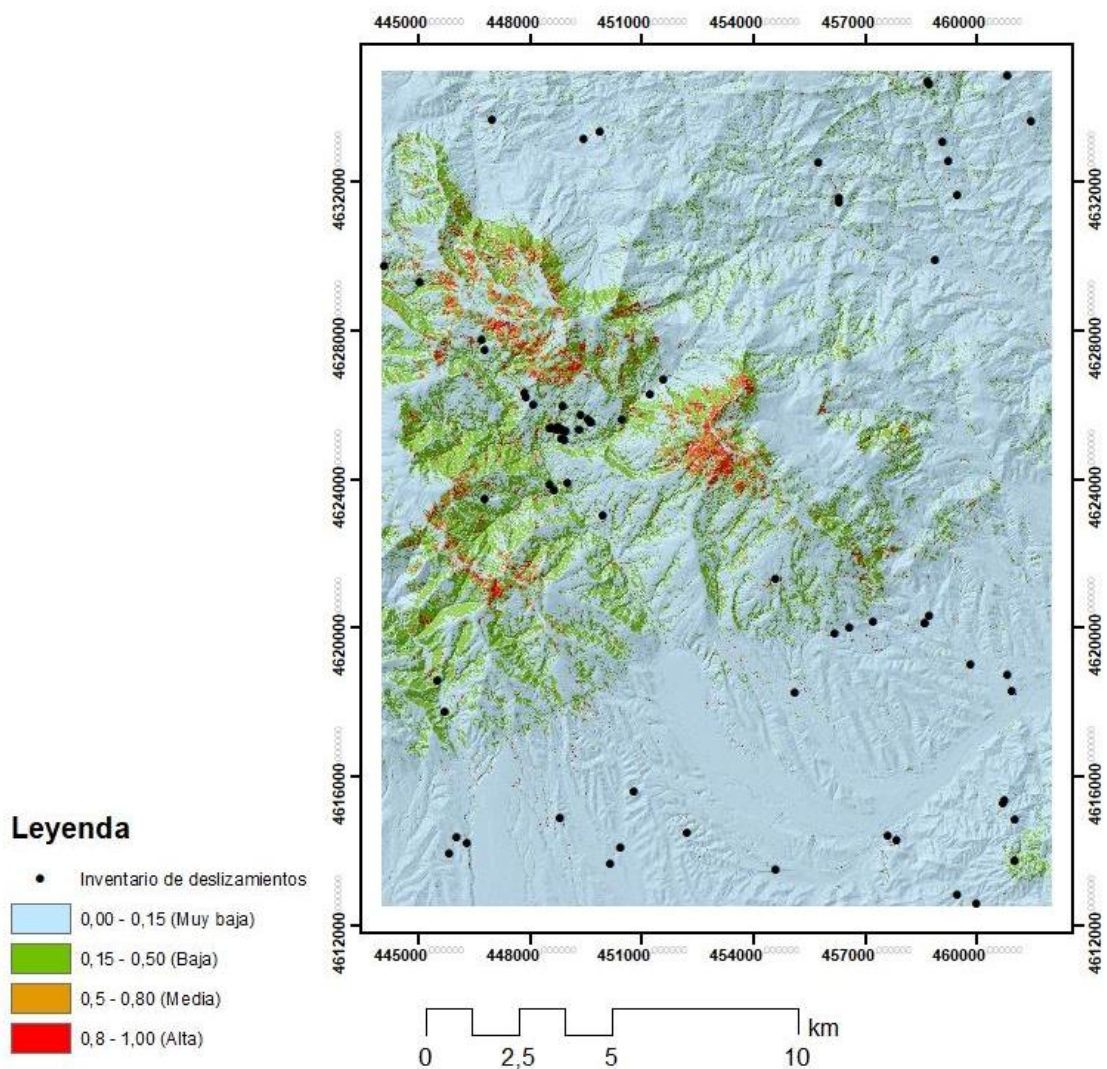


Figura 5.3. Probabilidades de rotura finales (tras el evento) calculadas por el FLSAM. Escala 1:150.000. Los puntos en color negro representan los puntos del inventario de deslizamientos.

5.2. Representación con diferentes unidades de terreno

Una vez obtenidos los resultados de probabilidad de rotura, se procedió a estudiar las diferentes unidades de terreno. Las opciones consideradas como unidades de terreno fueron las cuencas y medias cuencas hidrográficas con dos posibles flujos de trabajo con el software GRASS. La figura muestra la comparación de los resultados cuando se utiliza un DEM recortado o sin recortar, opciones denominadas 1 y 2, respectivamente. En ambos casos, se tienen pixeles con cinco metros de lado.

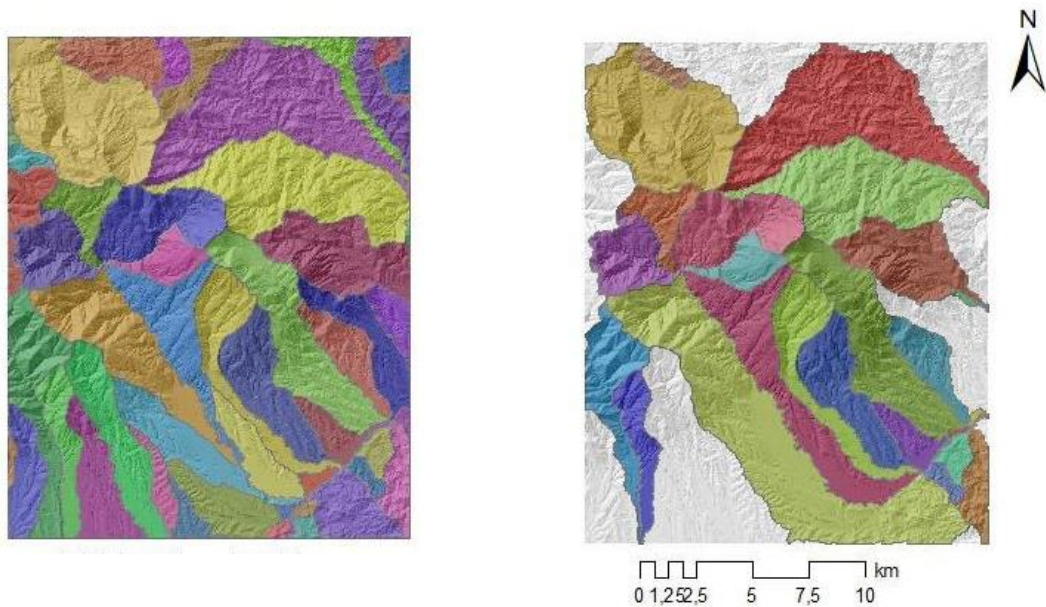


Figura 5.4. Mapas con medias cuencas hidrográficas con el GRASS. El número mínimo de píxeles es de 500 mil. A la izquierda se muestra el caso en que se utiliza un modelo digital de elevación (MDE) no recortado y a la derecha se utiliza un MDE con la envolvente de la zona de estudio.

A partir de la Figura 5.4 se observa que al utilizar un Modelo Digital de Elevación (MDE) recortado, las cuencas con extensión superior a los límites del área de estudio no pueden ser generadas. De este modo, en los contornos del área de estudio se tienen valores “No Data”. Los cuales, una vez transformado el mapa a polígonos representarían unidades que no tienen necesariamente una relación con la topografía del terreno. De este modo, se observa que, en lo que se refiere a la utilización del GRASS para generar cuencas hidrográficas, es más adecuado utilizar como dato de entrada, un MDE con extensión suficientemente superior al área de estudio y, una vez generadas las cuencas, recortar el mapa final.

En continuidad, para la opción 1 se evaluaron cinco diferentes tamaños mínimos de cuencas: 1000, 750, 500, 250 y 100 mil píxeles a partir de aquí denominadas opciones con 1000k, 750k y así sucesivamente. Para cada una de estas opciones se generaron mapas tanto para cuencas enteras como para medias cuencas. Los resultados obtenidos para tres de estos casos (500, 250 y 100k) con cuencas medias y enteras se muestran en la Figura 5.5 y en la Figura 5.6, respectivamente.

En las Figura 5.5 y Figura 5.6, se puede observar que las unidades de mayor tamaño se concentran en la porción más montañosa del terreno. Mientras que en la zona más llana se tienen cuencas más alargadas y más pequeñas.

También se puede constatar que las medias cuencas con 500 mil píxeles de tamaño mínimo, no producen el mismo resultado que una cuenca entera con la mitad de valor mínimo de píxeles (250 mil). Es decir, como es de esperar, la opción con cuenca enteras siempre proporciona unidades territoriales con áreas máximas mayores. Por esta razón, a fin de obtener unidades de terreno menores, pero que sigan representando zonas homogéneas del terreno desde un punto de vista geomorfológico se procedió a estudiar la estadística de áreas de los polígonos para las cinco opciones con medias cuencas.

La generación de estas medias cuencas y cuencas con algoritmos totalmente automáticos, y su posterior vectorización (paso de mapa ráster con píxeles a mapa de polígonos) genera determinados polígonos de pequeña área que no corresponden con cuencas hidrográficas reales, denominamos a este tipo de polígonos generados “artefactos”. En las cuencas generadas se consideró como artefactos aquellos polígonos con área igual o inferior al área del píxel, con formas rectangulares o triangulares. Fueron contabilizados 49, 34, 11 y 22 artefactos en los mapas de las opciones 100, 250, 500, 750 y 1000k, respectivamente.

Los artefactos y medias cuencas de pequeño tamaño generadas deberían agruparse con su respectiva media cuenca adyacente. Con el fin de automatizar esta agrupación debería hacerse previamente un análisis los artefactos con el fin de identificar con cuál de las medias cuencas agrupar o "disolver" dichos polígonos. Una solución podría ser analizar el parámetro de la orientación predominante en todos los polígonos para así hacer la agrupación con aquellos que presenten una orientación predominante similar.

A continuación, se evaluaron las áreas máximas, mínimas y medias en cada uno de los escenarios (ver Tabla 5-1), despreciando en los cálculos la contribución de dichos artefactos.

Teniendo en cuenta que los mapas tienen píxeles de 5 metros de lado, se esperaba que el promedio de áreas de los polígonos fuera superior a 1,25, 3,125, 6,25, 9,375 y 12,50 km² para los escenarios con 100, 250, 500, 750 y 1000 k, respectivamente. Con base en los resultados, esto solo se cumple para los tres primeros mapas. Esto puede ser debido a que, al recortar el mapa se obtienen cuencas incompletas en el contorno.

Tabla 5-1. Áreas en km² de las medias cuencas.

N.º Mín. de Píxeles	N.º Total de cuencas	Máxima	Mínima	Media
100k	224	11,53	5,00E-05	1,81
250k	123	19,43	1,00E-04	3,30
500k	66	36,24	1,00E-04	6,15
750k	54	50,39	1,00E-04	7,50
1000k	43	50,43	1,00E-04	9,43

De modo general, a partir de la distribución de áreas (ver Figura 5.7), se observa el predominio de los polígonos con áreas inferiores a 0,05 km², seguido de las cuencas con 5 a 10 km² en las opciones con 750 y 1000k. Mientras que, en los mapas de 250 y 500k las cuencas con 1 a 2,5 km² y 5 a 10 km² de área representan más de 50% del total. También es posible observar que se tiene una distribución más equitativa y con áreas menores con las opciones 100 y 250k.

En un análisis posterior, se compararon los mapas de medias cuencas de 100, 250 y 500k con la demarcación Hidrográfica de Cuencas Internas y con la red de flujo de Catalunya, descargadas del Catálogo Nacional de Reservas Hidrológicas. A través de esta comparación, se observó que, al generar medias cuencas menores como en los casos de 100 y 250k, algunas no contienen ninguna red de flujo en su interior, aunque no hubiesen sido recortadas por el contorno de la zona de estudio. Esta consideración se hace necesaria una vez que las cuencas cercanas al contorno pueden haber sido recortadas en su porción conectada a la red de flujo.

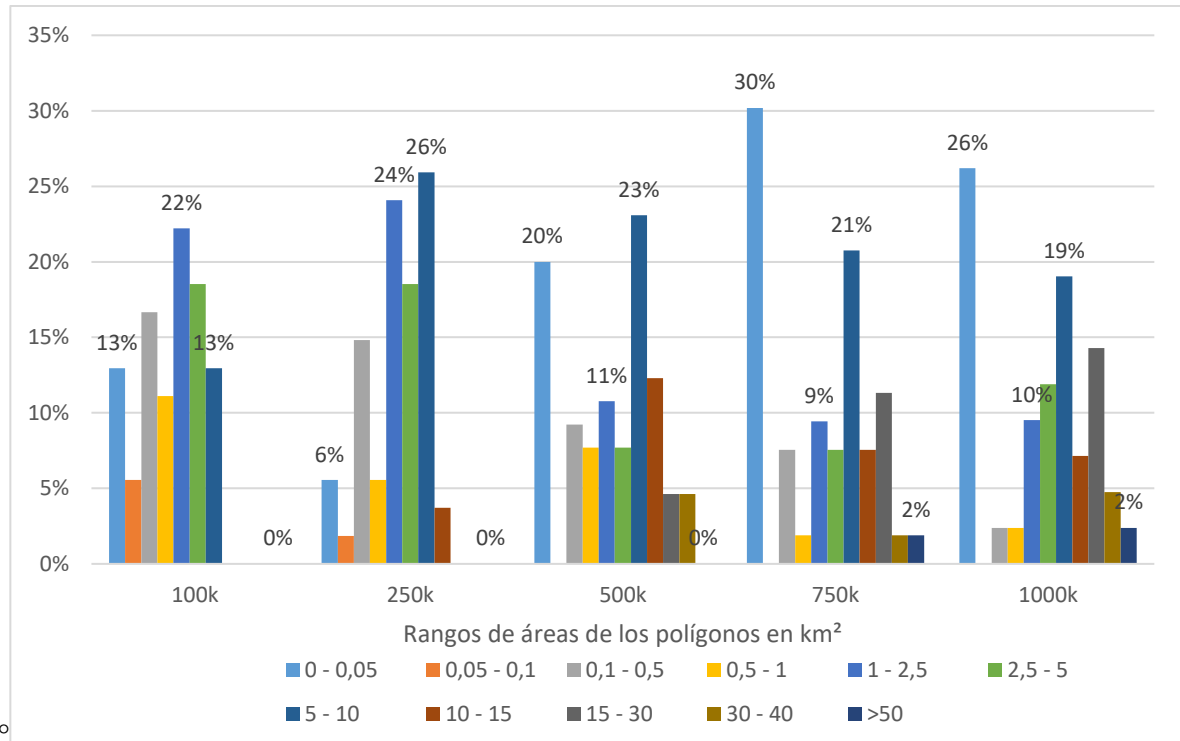
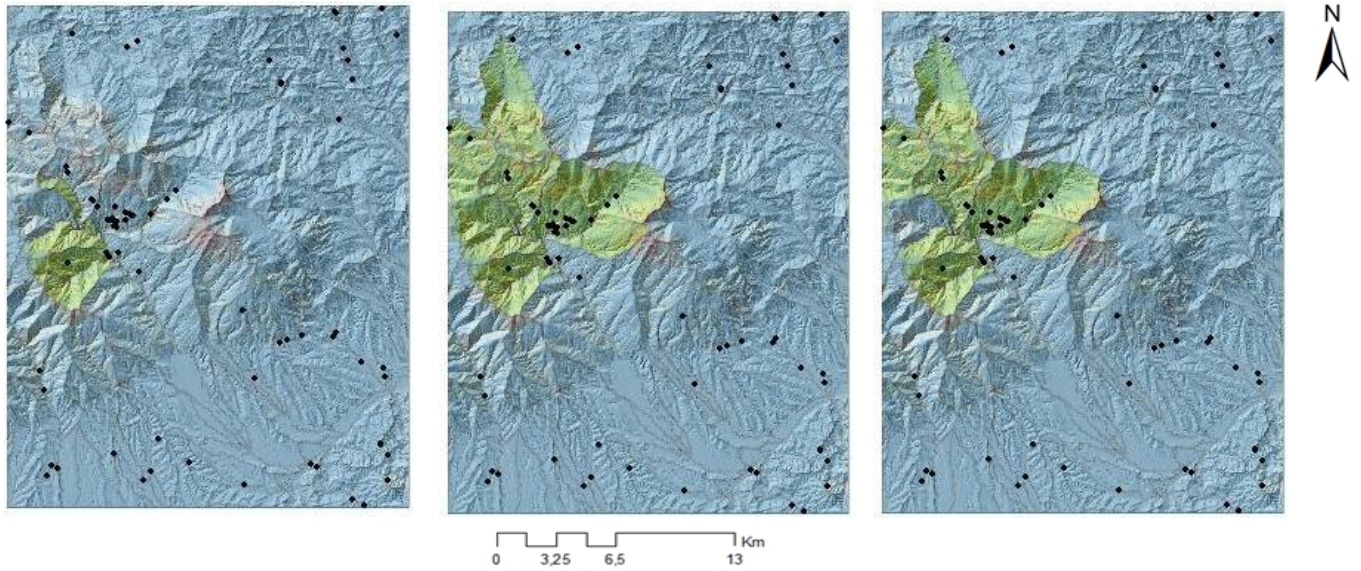


Figura 5.7. Distribución de áreas de las medias cuencas con tamaños mínimos de píxeles de 250, 500 y 750 mil.

Sin embargo, en lo que se refiere a unidades de terreno, aunque las medias cuencas más pequeñas no tengan correspondencia con la red de drenaje, debido a su morfología y distribución de tamaños, se considera que las opciones con tamaño mínimo de 100 y 250 mil píxeles sean las alternativas más adecuadas.

A partir de los datos de susceptibilidad de deslizamientos calculados en el FSLAM sobre píxeles de cinco metros, se buscaron criterios para definir la susceptibilidad de las unidades territoriales con formas de medias cuencas hidrográficas para las opciones con valores mínimos de entrada de 100 y 250 mil píxeles en el software GRASS. Estos últimos contienen polígonos con áreas que varían entre algunas centenas de metros cuadrados a algunas decenas de kilómetros cuadrados.

Con objetivo de definirse un único criterio para toda el área de estudio, se propusieron criterios estadísticos utilizando la media aritmética, la mediana y la media ponderada sobre los valores de probabilidad de rotura finales, es decir, tras el evento. Estos criterios fueron aplicados para las dos opciones de mapas de medias cuencas (100 y 250k). La Figura 5.8 y la Figura 5.9 muestran estos resultados, superpuestos al mapa ráster con las probabilidades de rotura finales y al inventario de deslizamientos. Los criterios de agrupación son los indicados en la Tabla 4-5 y en la Tabla 4-6, ambas del apartado 4.2.



Mediana

Media Aritmética

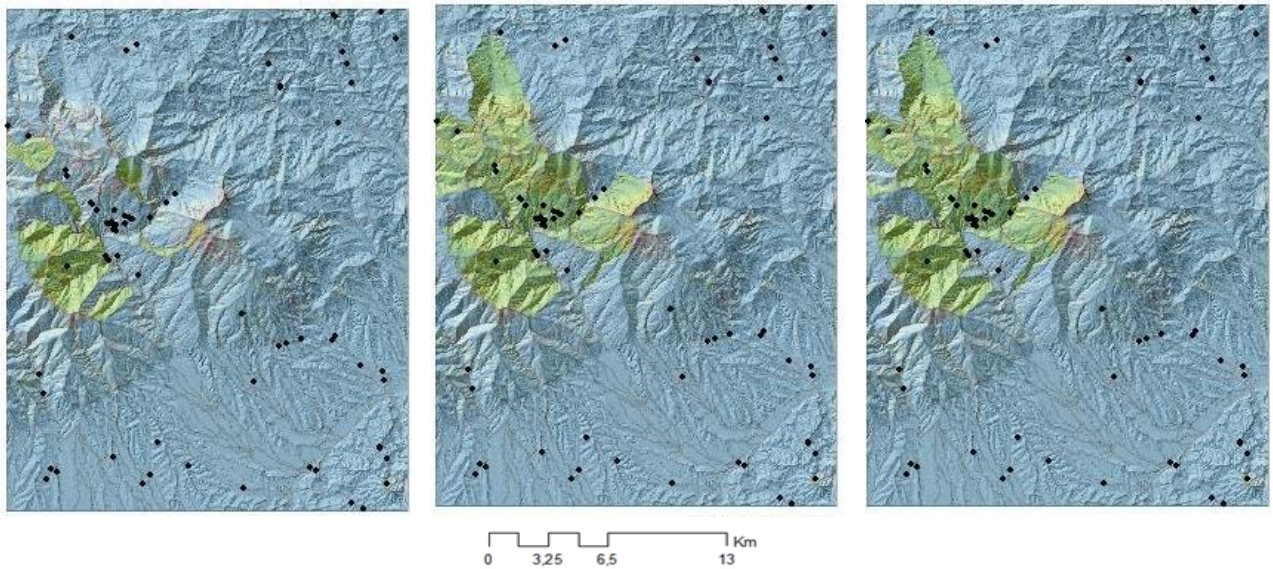
Media Ponderada

Susceptibilidad

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta

• Inventario de deslizamientos

Figura 5.8. Clases de susceptibilidad tras el evento de las unidades de terreno con criterios estadísticos. Mapa con medias cuencas con valor mínimo de 250 mil pixeles. Mapas en escala 1:250.000.



Mediana

Media Aritmética

Media Ponderada

Susceptibilidad

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta

• Inventario de deslizamientos

Figura 5.9. Clases de susceptibilidad tras el evento de las unidades de terreno con criterios estadísticos. Mapa con medias cuencas con valor mínimo de 100 mil píxeles. Mapas en escala 1:250.000.

Se puede observar que los mapas de susceptibilidad de deslizamientos con los criterios estadísticos proporcionan apenas clases de susceptibilidad muy baja a baja. Estas últimas en los tres criterios se concentran sobre todo en la porción del terreno de relieve más accidentado.

Entre los tres criterios, la agrupación de las probabilidades de rotura con base en la mediana es la opción que menos tiene en cuenta los píxeles de alta susceptibilidad.

Por otro lado, aunque las agrupaciones teniendo como criterios la media aritmética y ponderada sean más conservadoras respecto al criterio con la mediana se observa que, en las zonas con mayor densidad de píxeles de alta susceptibilidad, hay una predominancia de clases de susceptibilidad bajas, por lo que estos criterios no se consideran satisfactorios.

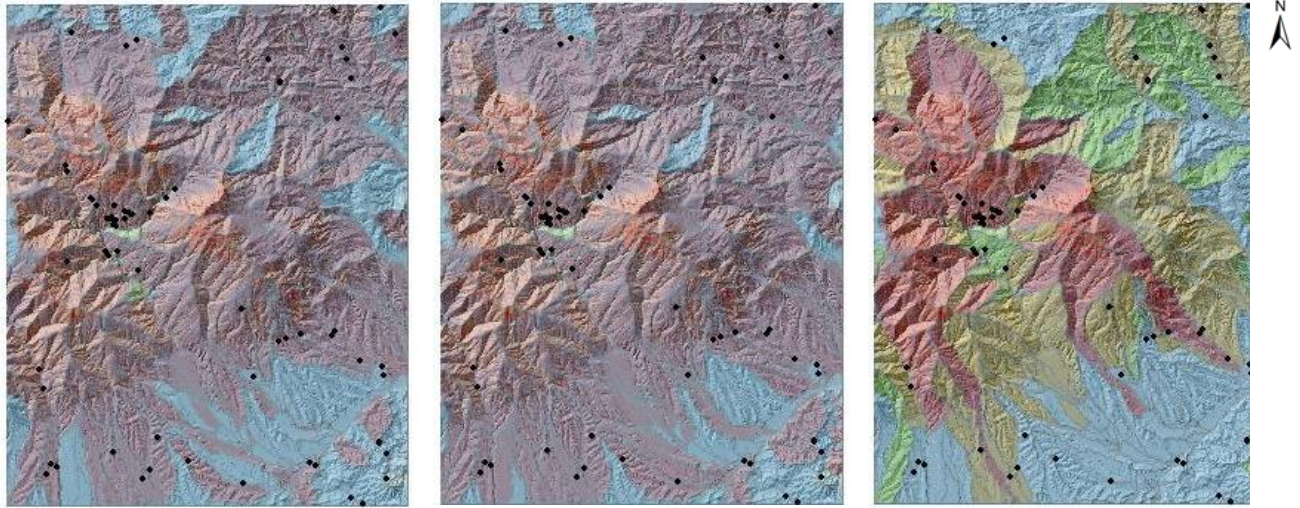
De este modo, se propusieron nuevos criterios teniendo en cuenta los siguientes aspectos:



- I. Las unidades territoriales utilizadas tienen una distribución de polígonos con áreas máximas de algunas centenas de metros cuadrados a algunas decenas de kilómetros cuadrados;
- II. Los valores de probabilidad de rotura se concentran sobre todo en áreas donde se tienen de modo general las unidades territoriales mayores;
- III. Los pixeles de mayor susceptibilidad se concentran en áreas cercanas a las líneas divisorias de aguas (línea de las cumbres).

Estos nuevos criterios fueron denominados criterios A, B, C, D y E. Los tres primeros se encuentran definidos en la Tabla 4-5, mientras que D y E se describen en la Tabla 4-6, ambos de la sección 4.3.

Así, como en la agrupación por criterios estadísticos mencionada anteriormente, se estudiaron estos cinco nuevos criterios para el mapa de polígonos de 100 y 250k. Los resultados se muestran desde la Figura 5.10 a la Figura 5.13.



Criterio A

Criterio B

Criterio C

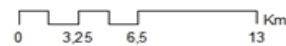
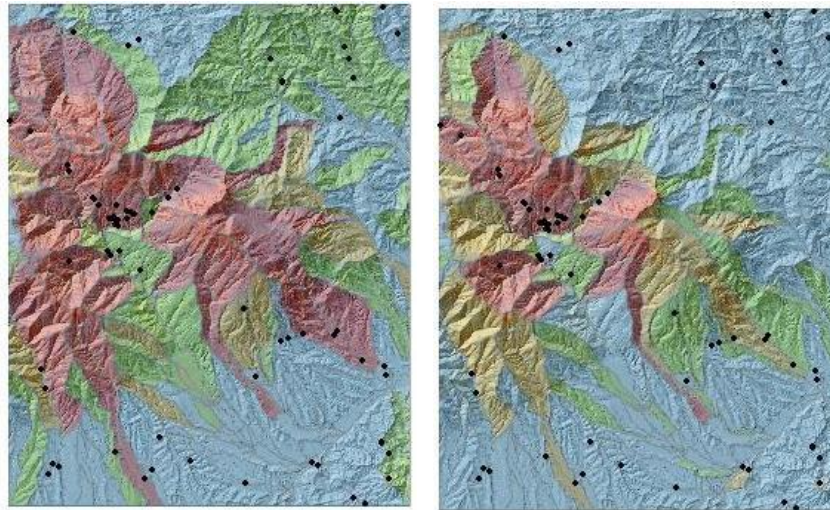
Susceptibilidad

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta

• Inventario de deslizamientos

Figura 5.10. Clases de susceptibilidad tras el evento de las unidades de terreno con criterios A, B y C. Mapas con medias cuencas con valor mínimo de 100 mil pixeles en escala 1:250.000.

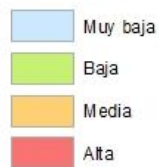




Criterio D

Criterio E

Susceptibilidad



• Inventario de deslizamientos

Figura 5.11. Clases de susceptibilidad tras el evento de las unidades de terreno con criterios D y E. Mapas con medias cuencas con valor mínimo de 100 mil píxeles en escala 1:250.000.

Teniendo en cuenta que cada píxel tiene cinco metros de lado, se buscó a través de los criterios A y B definir como susceptibilidad alta cualquier unidad territorial con 10 (Criterio A) o 40 (Criterio B) píxeles con probabilidad de rotura superior a 0,80, lo que corresponde a 250 y 400 m² de área proyectada en plano. Sin embargo, este criterio se mostró conservador, debido a la dispersión de los píxeles de alta susceptibilidad aislados en todo el mapa. De este modo, con estos dos criterios se clasifican, en su mayoría, las unidades territoriales como de susceptibilidad alta.

A partir de estas observaciones, se estudió el promedio de píxeles de alta susceptibilidad dentro de cada unidad territorial. Los resultados mostraron que cada unidad presenta en media 1.953 píxeles de alta susceptibilidad en la opción 100k y 2.073 para las unidades del mapa de 250k. De este modo, se propusieron los criterios C y D que definen la unidad territorial como de alta susceptibilidad cuando en esta se contabilizan píxeles de clase N4 (alta susceptibilidad) en conteo superior a 2500 píxeles (Criterio C) o a 1200 (Criterio D).

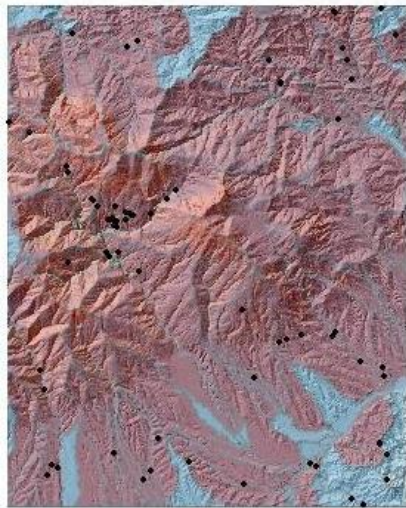
A partir de los resultados de los criterios C y D se observa que los píxeles de alta susceptibilidad cercanos a la línea de cumbre son clasificados como de alta susceptibilidad. Por otra parte, la principal diferencia entre estos dos resultados se da en la definición de la clase de media susceptibilidad, donde en “D” se tiene un criterio menos conservador que en “C”.

A continuación, se estudió la opción con el criterio E, el cual utiliza para todas las clases una proporción entre el conteo de píxeles y el área de la unidad territorial. Sin embargo, al tener áreas con magnitudes tan diversas cercanas entre sí, se tienen clasificaciones más bajas en comparación con los criterios C y D. Por otra parte, el criterio E no abarca los píxeles de alta susceptibilidad en las unidades territoriales cercanas a las líneas de cumbre.

De esta forma, en comparación a los demás criterios estudiados, se considera que las opciones C y D sean las opciones de criterio de agrupación más adecuadas.

De modo general, comparando criterio a criterio las dos opciones de unidades territoriales visualmente, se observa que con el mapa con 100k se obtiene una mejor correlación entre las clases de las unidades territoriales y los valores de probabilidad de rotura, posiblemente debido a que sus polígonos sean menores y más similares en área entre si respecto a los presentes en el mapa de 250k.

Para poder comparar los criterios C y D, se obtuvieron, para los puntos del inventario, los datos de cada clase de susceptibilidad de los píxeles del mapa de probabilidad de rotura finales y de la unidad territorial al cual pertenecen. Los resultados se muestran en forma de gráfico de columnas en la Figura 5.14.



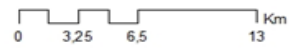
Criterio A



Criterio B



Criterio C



Leyenda

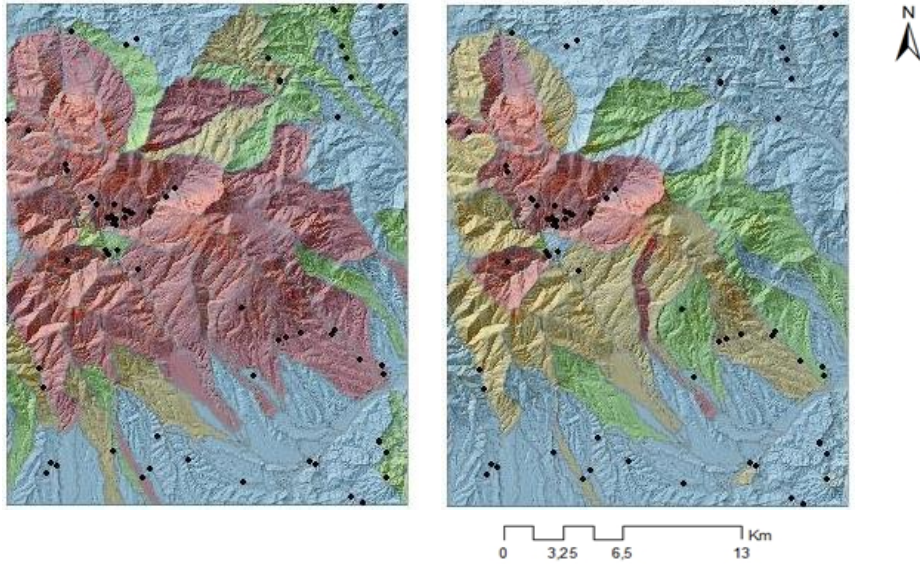
Clase de susceptibilidad

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta

- Inventario de deslizamientos

Figura 5.12. Clases de susceptibilidad tras el evento de las unidades de terreno con criterios A, B y C. Mapas con medias cuencas con valor mínimo de 250 mil píxeles en escala 1:250.000.





Criterio D

Criterio E

Susceptibilidad

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta
- Inventario de deslizamientos

Figura 5.13. Clases de susceptibilidad tras el evento de las unidades de terreno con criterios D y E. Mapas con medias cuencas con valor mínimo de 250 mil pixeles en escala 1:250.000.

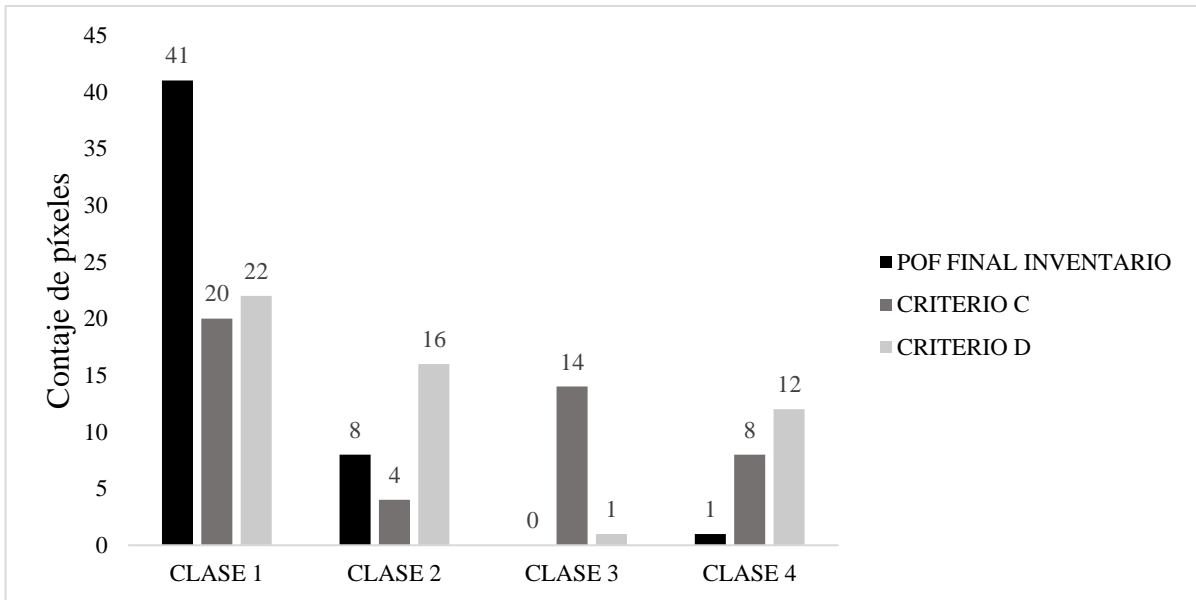


Figura 5.14. Clases de susceptibilidad de los píxeles del mapa de probabilidades finales y por criterios de agrupación para los puntos del inventario.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En síntesis, los análisis de susceptibilidad de deslizamientos a escala regional son complejos de obtener debido a que a esta escala no se dispone de información geotécnica detallada. Sin embargo, a través del FSLAM se pudo estimar la susceptibilidad de deslizamientos con base en informaciones que suelen estar disponibles a esta escala para una zona de 405 km² ubicada en el Parque del Montseny, entre las provincias de Girona y Barcelona.

Como lluvia del evento se utilizó la lluvia acumulada durante la borrasca Gloria con precipitaciones acumuladas entre 295 a 458 mm para la zona de estudio. Sin embargo, el modelo se mostró poco sensible a la lluvia del evento, ya que, al tenerla en cuenta en el FSLAM, el 88,68% de los píxeles tuvieron incrementos de probabilidad de rotura inferiores a 5%.

Con base en los resultados de susceptibilidad de rotura finales, se observa que la mayor probabilidad de rotura se encuentra en las zonas más accidentada del terreno. Aunque de modo general se obtuvieron píxeles de alta susceptibilidad distribuidos por toda la zona de estudio, estos visualmente son casi imperceptibles en el mapa, al tratarse de uno o unos pocos píxeles aislados.

En lo que se refiere a las cuencas y medias cuencas como UT, los resultados mostraron que para obtenerlas con el GRASS se requiere de modelos digitales de elevación con áreas de mayor extensión que el área que se pretendía estudiar. Además, las medias cuencas son más adecuadas al presentar áreas menores, sobre todo en la región más accidentada y en especial en las áreas cercanas a la línea de cumbre.

Por otro lado, se concluye que el valor mínimo del píxel utilizado para generar las cuencas afecta a la distribución de áreas de los polígonos. Las unidades territoriales con tamaños más similares entre si se consiguieron con valores mínimos de píxeles menores, en este caso 100 y 250k.

Con respecto a los criterios de agrupación para unidades territoriales estudiadas, se verificó que la utilización de variables estadísticas — tales como media aritmética, mediana y media ponderada — para agrupación de las clases de susceptibilidad no proporcionaron resultados satisfactorios. Esto puede ser debido a que se obtuvo mayor susceptibilidad en la porción más montañosa del terreno, en la cual se tienen unidades territoriales mayores.

Con el objetivo de encontrar otras formas de agrupación más representativas, se buscaron otros criterios para agrupación de las probabilidades de rotura. Los criterios A y B se mostraron muy conservadores, debido a que, al tener píxeles de alta susceptibilidad con gran dispersión, la mayoría de las unidades de terreno serían de alta susceptibilidad.

Con base en los resultados de A y B, se propusieron los criterios C y D que tienen como criterio de alta susceptibilidad un conteo de píxeles del orden de magnitud del promedio de las cuencas. Estos criterios se mostraron más satisfactorios para este análisis. Mientras que el criterio E, al tener en cuenta el área de la unidad territorial, es menos conservador que C y D.

En términos del análisis de susceptibilidad de deslizamientos superficiales desencadenados por lluvias, una vez que el modelo FLSAM es más sensible a la cohesión (Medina et al., 2021),

futuras investigaciones podrían variar esta propiedad del suelo y comparar como su valor asignado afectaría las clases de susceptibilidad también en las porciones más bajas del área de estudio.

En relación a las unidades de terreno, una vez que con medias cuencas hidrográficas se tiene polígonos con áreas muy diversas se podría investigar el uso de criterios distintos según el tamaño de la unidad territorial.

7. REFERENCIAS

- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., & Guzzetti, F. (2016). Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geoscientific Model Development*, 9(11), 3975–3991. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3975-2016>
- Calvello, M., Cascini, L., & Mastroianni, S. (2013). Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. *Geomorphology*, 182, 33–48. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.026>
- CREAF. (2020). *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya*. <https://www.creaf.uab.es/mcsc/>
- DIBA. (2021). *Geografia física - Montseny*. <https://parcs.diba.cat/es/web/montseny/geografia-fisica>
- Equipo desarrollador QGIS. (2021). *Qgis*. <https://www.qgis.org>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- GENCAT. (2021). *Inici. Departament de la Vicepresidència i de Polítiques Digitals i Territori*. <https://territori.gencat.cat/ca/inici>
- GRASS Development Team. (2021). *GRASS GIS*. <https://grass.osgeo.org/learn/overview/>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1–2), 166–184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- ICGC. (2019). *Idescat. Anuario estadístico de Cataluña. Pluviometría. Precipitación mensual. Comarcas y Aran*. Departamento de Territorio y Sostenibilidad (Undefined). Servei Metereològic de Catalunya (Undefined). <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=217&lang=es>
- ICGC. (2021a). *Idescat. Anuario estadístico de Cataluña. Termometría. Temperaturas máximas. Comarcas y Aran*. <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=215&lang=es>
- ICGC. (2021b). *Inici. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*. ICGC. <https://icgc.cat/>
- Lambe, T. W. ., & Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*. Wiley.

- Medina, V., Hürlimann, M., Guo, Z., Lloret, A., & Vaunat, J. (2021). Fast physically-based model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale. *Catena*, *201*, 1–42. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105213>
- Palau, R. M., Hürlimann, M., Berenguer, M., & Sempere-Torres, D. (2020). Influence of the mapping unit for regional landslide early warning systems: comparison between pixels and polygons in Catalonia (NE Spain). *Landslides*, *17*(9), 2067–2083. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01425-3>
- Papa, M. N., Medina, V., Ciervo, F., & Bateman, A. (2013). Derivation of critical rainfall thresholds for shallow landslides as a tool for debris flow early warning systems. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4095-2013>
- Suñé, R. (2020, January 25). El paso de la borrasca ‘Gloria’ deja una factura multimillonaria. *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/vida/20200125/473105488136/temporal-gloria-costes-economicos-materiales-espana-cataluna.html>
- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A. C., & Peruccacci, S. (2010). Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology*, *114*(3), 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.020>
- Scheidegger, A. E. (1994). Hazards: singularities in geomorphic systems. *Geomorphology*, *10*(1–4), 19–25. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90005-1)
- Sun, X., Chen, J., Bao, Y., Han, X., Zhan, J., & Peng, W. (2018). Landslide susceptibility mapping using logistic regression analysis along the Jinsha river and its tributaries close to Derong and Deqin County, southwestern China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *7*(11), 1–29. <https://doi.org/10.3390/ijgi7110438>
- Sun, X., Chen, J., Han, X., Bao, Y., Zhou, X., & Peng, W. (2020). Landslide susceptibility mapping along the upper Jinsha River, south-western China: a comparison of hydrological and curvature watershed methods for slope unit classification. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *79*(9), 4657–4670. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01849-0>
- USDA. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. (55th ed.). National Resources Conservation Service.

ANEXO I



Descripción del Epígrafe

Capl	Lidites i pissarres silíciques. Carbonífer.
Dc	Calcosquists i calcàries argiloses. Devoniana mitjà.
Fdq	Filons de pòfirs de diorítics a quarsdiorítics. Carbonífer-Permià.
Fgd	Filons de pòfirs granodiorítics. Carbonífer-Permià.
Fla	Filons de lampròfirs. Triàsic-Juràssic.
Fmg	Filons de roques bàsiques de composició monzogàbrica a gàbrica. Carbonífer-Permià.
Fmm	Filons de pòfirs monzonítics a monzonosienítics. Carbonífer-Permià.
Fps	Filons de roques de composició sienítica a monzodiorítica. Carbonífer-Permià.
Fq	Filons de quars. Carbonífer-Permià.
Ggd	Granodiorites i granits alcalins. Carbonífer-Permià.
Gl	Leucogranits. Carbonífer-Permià.
Gng	Ortogneis. Granitoides indiferenciats afectats pel metamorfisme regional hercinià. Edat del metamorfisme: Carbonífer-Permià.
Gp	Granits porfírics. Carbonífer-Permià.
Gpg	Pòfirs àcids. Carbonífer-Permià.
NMa	Argiles i gresos arcòsics. Aragonià superior - Vallesia.
NMcg1	Conglomerats amb petites intercalacions de sorres i argiles vermelles. Vallesia i Turolia.
NMcga	Nivells lenticulars de conglomerats amb matriu sorrenca arcòsica. Aragonià-Vallesia.
NMgc	Sorres arcòsiques i conglomerats molt heteromètrics. Aragonià.
PEcgr	Conglomerats i gresos vermells. Formació Romegats. Lutecià inferior.
PEgc	Gresos i conglomerats. Cusià.
PPEa	Argiles i gresos. Paleocè.
Qec	Dipòsits al·luvials-col·luvials. Llims amb clasts angulosos. Holocè.
Qep	Tarteres o esbaldregalls de pendent recents o actuals. Holocè actual.
Qg	Peu de mont (enderrocs de pendent i fàcies proximals de ventalls al·luvials). Plistocè.
Qr	Dipòsits dels llits actuals de les rieres i dels torrents. Holocè.
Qv3	Ventall al·luvial correlacionable amb Qt3. Plistocè superior.
SDc	Calcàries noduloses i pissarres sericítiques. Silurià - Devoniana inferior.
Tbg	Alternança de gresos silícics i argiles. Fàcies Buntsandstein. Triàsic inferior.
mc_Orp	Fil·lites i comubianites. Roques de la unitat Orp afectades pel metamorfisme de contacte hercinià. Edat del metamorfisme: Carbonífer-Permià.
mc_ÇOrp	Fil·lites i comubianites. Roques de la unitat ÇOrp afectades pel metamorfisme de contacte hercinià. Edat del metamorfisme: Carbonífer-Permià.
ÇOrp	Pissarres micàctiques i pissarres sorrenques. Cambroordovicià o Ordovicià.

Descripción del Epígrafe de la Figura 3.3. (ICGC, 2021b)