

OBTENCIÓN DE UNIDADES DE LADERA (SLOPE UNITS) EN CATALUNYA

V. SASTRE (1), A. MARTÍ (1), P. BUXÓ (1) y J. MARTURIA (1)

(1) Institut Cartogràfic y Geològic de Catalunya (ICGC)

Valentin.saste@icgc.cat, anna.marti@icgc.cat, pere.buxo@icgc.cat, jordi.marturia@icgc.cat

RESUMEN

ICGC obtuvo para el conjunto del territorio de Catalunya tres coberturas de polígonos continuos de unidades de ladera (Slope Units o SU) correspondientes a sendos niveles de detalle mediante el tratamiento automático del modelo digital de elevaciones (DEM). Para la obtención de la SU se utilizó el algoritmo de GRASS “r.watershed” parametrizado según el relieve de las zonas a caracterizar y un conjunto de herramientas adicionales para asegurar la coherencia entre las distintas coberturas. Cada SU, sea cual sea su nivel de detalle, tiene asociados los siguientes campos: i) codificación, ii) área, iii) altitud del punto más elevado, iv) altitud del punto más bajo, v) desnivel, vi) pendiente y vii) orientación. Dichas coberturas se ponen a disposición de los usuarios. El artículo describe los procesos de obtención de la SU y resultados obtenidos.

Todo el trabajo se llevo a cabo mediante el software abierto QGIS 3.10.6, que incorpora en su interfaz los algoritmos hidrológicos del software GRASS GIS necesario para las operaciones principales.

1. INTRODUCCIÓN

La unidad cartográfica que delimita zonas de terreno con condiciones geomorfológicas propias y su definición es la base para establecer y definir los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera (Carrara, et al., 1995) (Guzzetti, et al., 2006). Tradicionalmente las unidades más utilizadas son las de celdas de cuadrícula (píxeles o ràster) y las unidades de ladera (Reichenbach, et al., 2018). Las celdas de cuadrícula se obtienen directamente a través de un modelo digital de elevaciones (DEM) y la resolución de las variables predictoras se asume que corresponde a la de los píxeles del DEM. En este caso la partición es fácil y rápida y, en general, la modelización de la susceptibilidad utilizando píxeles ofrece un rendimiento eficiente. Sin embargo, presentan ciertas limitaciones; resultan demasiado locales para diagnosticar condiciones inestables, o bien dificultan la lectura de los mapas de resultado basados en píxeles (mosaicos cada uno con una susceptibilidad específica, sin coherencia espacial ni conectividad entre los píxeles adyacentes) hecho que las convierte en poco amigables para los planificadores del territorio.

Por este motivo, se está imponiendo la utilización de las unidades de ladera (Slope Units o SU en su denominación inglesa), que se definen como unidades de terreno limitadas por líneas de drenaje y divisorias de agua que pueden incluir una combinación de vertientes adyacentes o pequeñas cuencas,

y corresponden a lo que un geomorfólogo o hidrólogo podría reconocer como una ladera singular. En comparación con otras divisiones del terreno, las SU están directamente relacionadas con los procesos y condiciones geomorfológicas e hidrológicas que dan forma a los relieves naturales. Es por ello por lo que las SU son muy útiles en la modelización y el cálculo de la susceptibilidad a deslizamientos. Además, se puede asumir que la cinemática completa de los movimientos de ladera (iniciación, propagación y acumulación) se produce en el interior de la misma unidad. Aun así, no todo son ventajas, los criterios de división del SU pueden distorsionar la eficacia predictiva de los modelos de susceptibilidad, resultando en unidades demasiado grandes no adecuadas para determinar dinámicas específicas de los movimientos de ladera. Además, una definición de SU no lo suficientemente cuidada puede provocar que la caracterización de las unidades de pendiente esté demasiado suavizada (Amato, et al., 2019).

2. ANTECEDENTES, DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

la Agencia Catalana del Agua (ACA), atendiendo sus funciones de caracterización del medio hídrico en Cataluña, delimito de manera continua para todo el territorio las cuencas hidrográficas en cinco niveles de detalle a partir del modelo de elevaciones 15x15 metros. En la Figura 1 se muestra la construcción de diferentes niveles de detalle para la definición de las cuencas de una misma zona. Las cuencas delimitadas por la ACA representan un conjunto de datos de referencia en cuanto a la magnitud o tamaño general de los polígonos. El concepto de los niveles de detalle, que facilita la posterior explotación de los datos según el ámbito concreto de cada aplicación, se tomó para definir 3 niveles de detalles de las unidades de ladera.

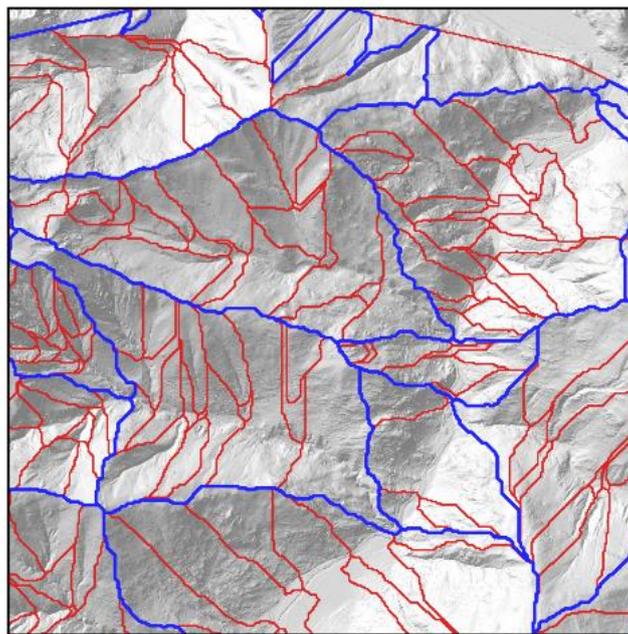


Figura 1.- Cuencas delimitadas por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA). Los colores indican niveles de detalle distintos.

Posteriormente a la delimitación de cuencas de la Agencia Catalana del Agua, el *Ministerio de Transición Ecológica* español publicó en el año 2016 una delimitación, para todo el territorio estatal, de las subcuencas de tramos de río clasificadas según el método Pfafstetter modificado (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2016). Las subcuencas del MITECO (Figura 2) representan, similarmente a la delimitación del ACA, una referencia base en cuanto a la magnitud o tamaño medio de las cuencas. Además, en el ámbito concreto de la aplicación de las SU como base para el estudio de susceptibilidad a movimientos del terreno, el trabajo del MITECO realiza una caracterización física y geomorfológica de las cuencas, asignando a cada uno de los

polígonos parámetros como la longitud, el perímetro, coeficientes de forma, cotas y desniveles o la pendiente media. Esta aproximación, es muy interesante y debe tenerse presente en cualquier generación de unidades de vertiente.

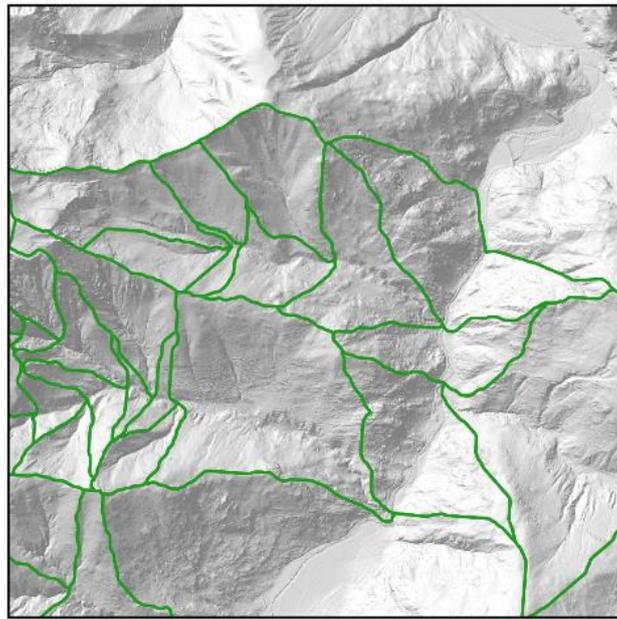


Figura 2. Cuencas delimitadas per MITECO según el método Pfafstetter modificado.

3. METODOLOGIAS DE CÁLCULO

Si bien la información de partida para la delimitación de SU es siempre el modelo digital de elevaciones (a menudo complementado con otros conjuntos de datos, como la red hidrológica) para el cálculo y la delimitación se destacan tres enfoques principales en función de los parámetros de clasificación utilizados.

Los 2 primeros recurren a la utilización del modelo de relieve invertido; ya sea con el enfoque de los parámetros hidrológicos (*Método hidrológico con DEM invertido*) o con los parámetros geométricos de curvatura del relieve (*Método de curvatura DEM invertido*); y el tercero realiza los cálculos directamente sobre el modelo de relieve original. Este último se concreta principalmente en los trabajos realizados sobre los algoritmos desarrollados por GRASS GIS en su módulo hidrológico (*Método hidrológico con algorítmica de GRASS GIS*).

Para seleccionar el método más adecuado al presente trabajo, se realizaron diferentes pruebas piloto sobre una zona de estudio de interés y se valoran cualitativamente los resultados desde un punto de vista analítico en la caracterización del terreno.

Método hidrológico con DEM invertido

De acuerdo con los artículos consultados (Wang, et al., 2017) (Sun, et al., 2020) (Yu & Chen, 2020) es el método actualmente más comúnmente utilizado. Esta propuesta incorpora los procesos de cálculo de parámetros hidrológicos sobre el modelo de elevaciones y sobre el modelo de elevaciones invertido (multiplicado por -1) (Figura 3). Tras llevar a cabo las primeras pruebas, el método presento problemas cuando se aplicó a una escala regional. Si bien los resultados eran satisfactorios en las zonas de pendiente elevada, como los parajes montañosos, presenta errores en áreas más horizontales, generando líneas de drenaje anómalas que no se adecuaban a los fondos de valle y, por tanto, el resultado eran cuencas con formas poco naturales.

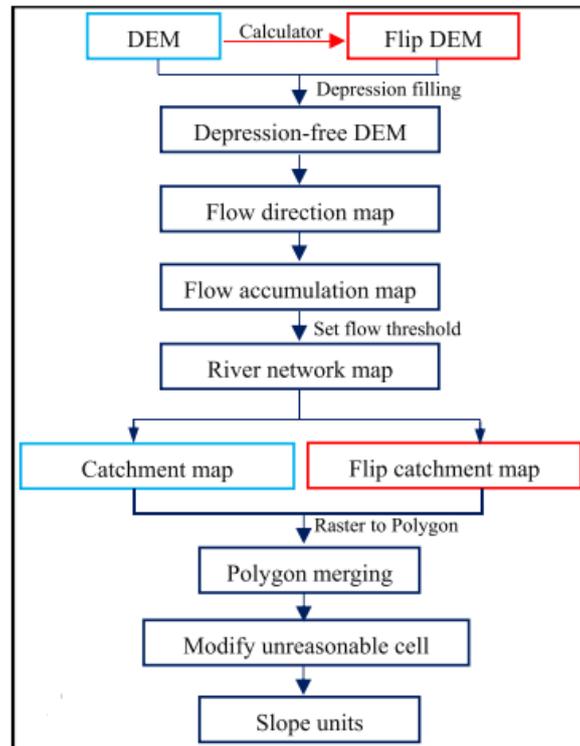


Figura 3. Diagrama de flujo de trabajo del método hidrológico con MDE invertido.

Método de la curvatura: DEM invertido

El método de curvatura utiliza la curvatura media del terreno para delimitar las SU (Sun, et al., 2020) (Yu & Chen, 2020). La curvatura media se calcula como el valor medio de la curvatura del perfil y la curvatura del plano. La curvatura de perfil se mide paralela a la pendiente e indica la dirección de pendiente máxima. Afecta a la aceleración y desaceleración de las corrientes por la superficie (Figura 4).

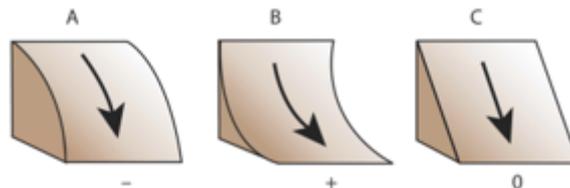


Figura 4. Curvatura del perfil (a) negativa; (b) positiva; y (c) cero.

La curvatura del plano se mide perpendicular a la dirección de la pendiente máxima y se relaciona con la convergencia y divergencia de la corriente por una superficie (Figura 5).

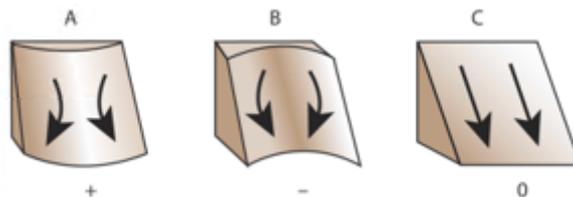


Figura 5. Curvatura del plano (a) positiva; (b) negativa; y (c) cero.

Los valores máximos y mínimos del perfil pueden indicar márgenes de altiplanos y valles, mientras que los valores máximos y mínimos del plan pueden indicar áreas de cambio repentino de la orientación de la pendiente.

El proceso implica inicialmente el cálculo de la curvatura del relieve tanto para el modelo de elevaciones original como para el modelo invertido. A partir de estos resultados se calculan las áreas de aportación, que se corresponden directamente con las unidades de vertiente (Figura 6).

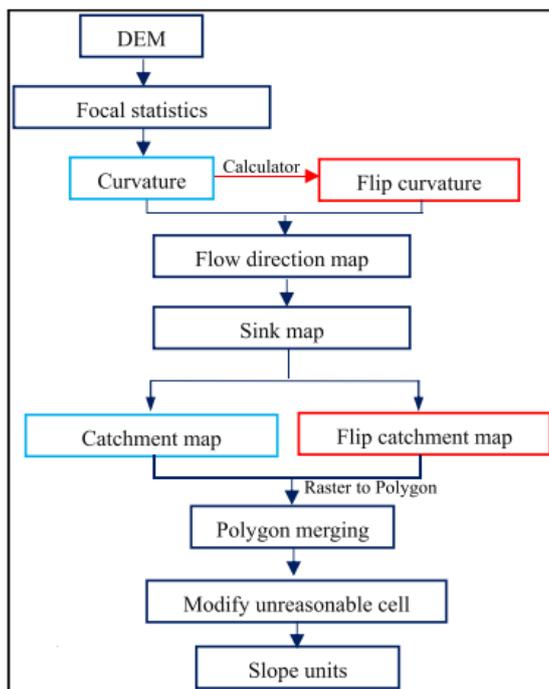


Figura 6. Diagrama del flujo de trabajo del método de curvatura con modelo de elevaciones invertido.

Método Hidrológico

Por último, el método hidrológico presenta una solución más directa gracias al algoritmo desarrollado en el software GRASS (GIS) llamado "r.watershed". Este algoritmo incorpora en una única herramienta los cálculos de los principales parámetros hidrológicos a partir de un modelo digital de elevaciones. Uno de los resultados que genera es la delimitación de lo que llama *half basins* (medias cuencas), que corresponden directamente con las unidades de vertiente.

El nivel de detalle, y por lo tanto la magnitud media, de las unidades resultantes de este proceso viene determinado por el parámetro umbral de tamaño mínimo de la cuenca hidrográfica exterior. Este valor, en unidades de píxel, representa que una cuenca se creará cuando al menos este número de celdas drenen hacia un cierto punto de drenaje. El resultado de este proceso genera habitualmente algunas cuencas de dimensiones muy reducidas, especialmente en las zonas de fondo de valle. Esto requiere, pues, de pasos de post procesamiento adicionales consistentes en la generalización o limpieza de estas mediante la fusión con las cuencas generadas adyacentes que comparten características físicas.

El *Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche* italiano (IRPI-CNR) desarrollo una herramienta que incorpora al algoritmo *r.watershed* la optimización del cálculo de los parámetros de entrada y un complejo análisis estadístico del resultado para llevar a cabo el proceso de generalización (Alvioli, et al., 2016) (Alvioli, et al., 2020). Este enfoque, basado en el algoritmo GRASS y en el análisis estadístico para optimizar el resultado, fija las bases principales del método desarrollado en el presente trabajo.

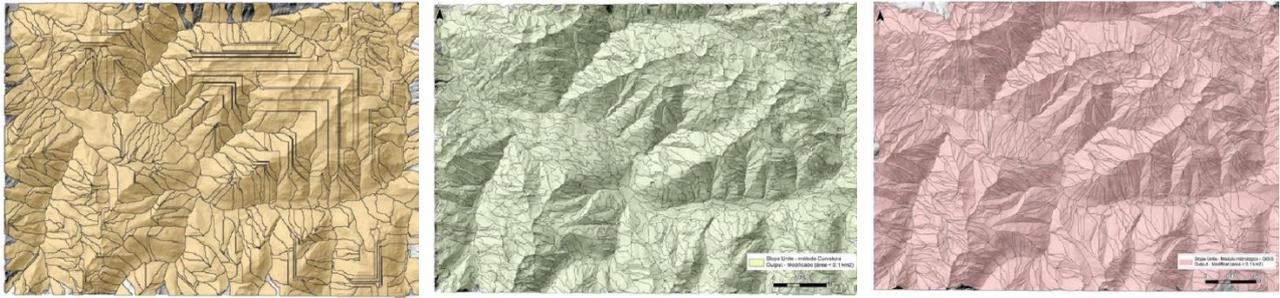


Figura 7. Comparativa de los 3 métodos de obtención de SLU. a) Método hidrológico con DTM invertido; B) Método de curvatura DTM invertido; y C) Método hidrológico con algorítmica de GRASS GIS

3. OBTENCIÓN DE LAS UNIDADES DE VERTIENTE EN CATALUNYA

Analizando los resultados y las problemáticas surgidas en cada uno de los métodos se estableció el método hidrológico de GRASS GIS para realizar la delimitación de SU a partir del DEM, porque se mostró como el método que aportó resultados más consistentes y homogéneos independientemente del tipo de relieve. Tal y como se ha descrito en puntos anteriores, se generaron coberturas continuas y completas para toda Cataluña con tres niveles de detalle y mediante el método hidrológico, seguido de operaciones de generalización y refinación que garantizan la calidad del resultado y la coherencia entre los diferentes niveles de detalle.

En este apartado se describen las partes del proceso de obtención de las unidades de ladera, desde los datos de partida hasta los pasos llevados a cabo durante el procesado completo.

Modelo digital de elevaciones de Catalunya (DEM)

El conjunto de datos de partida de este proceso es el modelo digital de elevaciones de Catalunya (ICC, 2013). Actualmente, este producto se encuentra disponible en resoluciones espaciales de 2, 5 y 15 metros. Aunque siempre se persigue el objetivo de alcanzar la mayor precisión posible, el uso de la malla de elevaciones 2x2 metros presenta inconvenientes en cuanto a la introducción de ruido en el procesado y en cuanto a la velocidad y capacidad de las múltiples operaciones de cálculo y procesado. Por este motivo, se decidió utilizar la malla de resolución espacial 5 metros, ya que generaba un resultado de alta precisión y no conllevaba problemas de ruido.

División del territorio en unidades de relieve

El parámetro de tamaño mínimo de la cuenca hidrográfica exterior, que determina el número mínimo de celdas que deben drenar a un punto para generar una unidad de vertiente, genera diferentes resultados según el tipo de relieve donde se aplica el algoritmo r.watershed. Partiendo de esta premisa y siguiendo el trabajo realizado por (Alvioli, et al., 2020), se dividió el territorio en zonas de relieve según su pendiente. Se determinaron tres tipos de relieve: de pendiente suave ($< 5^\circ$), moderado ($5-30^\circ$) y abrupto ($> 30^\circ$). De esta manera, se llevó a cabo el procesado de las diferentes zonas de manera independiente, ajustando el parámetro umbral según el tipo de relieve (Figura 8).

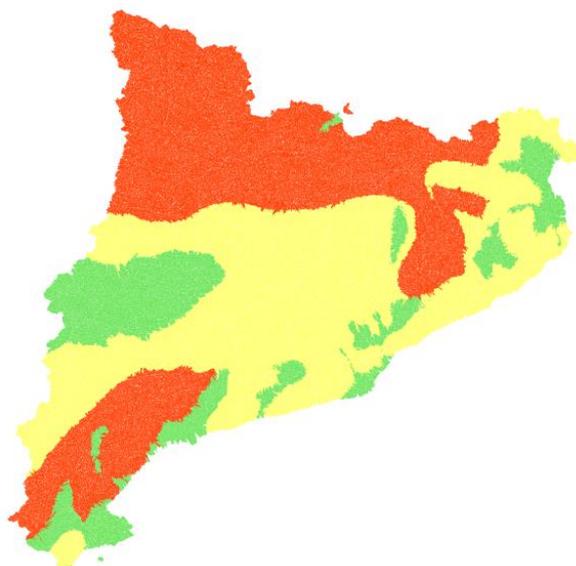


Figura 8. Zonas de relieve en Cataluña. Pendiente suave (verde), moderado (amarillo) y abrupto (rojo).

Obtención de subcuencas mediante GRASS GIS

Cada tipo relieve fue procesado mediante el algoritmo *r.watershed* de forma independiente modificando el parámetro de tamaño mínimo de la cuenca exterior según el tipo de relieve (Tabla 1). El parámetro de procesado, pues, se diferenció según el tipo de relieve y los niveles de detalle que se acordaron de menor (N1) a mayor detalle (N3).

Nivel de detalle	Zonas con pendiente suave (<5°)	Zonas con pendiente moderado (5-30°)	Zonas con pendiente abrupto (>30°)
N1	8,00 km ²	2,00 km ²	1,00 km ²
N2	4,00 km ²	1,00 km ²	0,50 km ²
N3	2,00 km ²	0,50 km ²	0,25 km ² (*)

Tabla 1. Parámetros de procesado (*r.watershed*): "Minimum size of exterior watershed basin".

De acuerdo con el trabajo de (Alvioli, et al., 2016) el parámetro inicial de referencia, utilizado para las zonas de mayor pendiente al nivel de máximo detalle (*), se estableció en 0,25 km² (equivalente a 10.000 píxeles de 5x5 metros). La obtención del parámetro para el resto de las categorías de relieve y los niveles de detalle se realizó por multiplicidad de la definición del parámetro inicial. La validez del parámetro se validó para cada procesado de manera cualitativa por comparación a las cuencas de referencia (ACA y MITECO).

Segregación de subcuencas por orientación

Las *half basins* resultantes del procesado ya vectorizadas en polígonos generaron, como se mencionó, unidades de ladera de dimensiones muy reducidas a las zonas de fondo de valle. Para corregir este problema se llevó a cabo una generalización en la que se descartaron estos polígonos pequeños fusionándolos con los polígonos adyacentes manteniendo la coherencia hidrológica. Durante este proceso debió garantizarse que una unidad de ladera no se fusionara con otra unidad de orientación radicalmente diferente, de manera que una SU no cruzara una línea de fondo de valle o de cresta, elementos geomorfológicos que delimitan una unidad de vertiente por definición.

Por este motivo, a cada una de las SU, se les asignó la orientación mayoritaria reclasificada en norte, este, sur u oeste. Posteriormente se segregó la cobertura en cuatro capas según la orientación para llevar a cabo la generalización.

Generalización y coherencia entre niveles de detalle

El proceso de generalización se realizó mediante la herramienta de geoprocésamiento de eliminación. Durante este proceso se seleccionaron todos los polígonos de área menor a un valor establecido y se fusiono con el polígono adyacente con el que comparte una mayor longitud de contorno común. El valor de área mínimo determinado para realizar esta operación se define en la mitad del valor del parámetro de tamaño mínimo de la cuenca hidrológica exterior.

Una vez que estuvo realizada la generalización en todas las capas de SU para los diferentes niveles de detalle y orientaciones, se agregaron dando lugar al resultado final. Como último paso de limpieza, se aplicó nuevamente el geoprocésamiento de eliminación con un valor mínimo de superficie fijado en 20.000 m², tal y como describe (Alvioli, et al., 2020).

Generadas las coberturas completas para los tres niveles de detalle, se realizó un último proceso para garantizar que los niveles de detalles fueran coherentes. Esto significa que, una unidad de ladera de nivel N3 debe ser equivalente a una o más unidades de nivel N2, así como cada una de las cuencas N2 debe ser equivalente a una o más unidades de ladera de nivel N1 (Figura 9).

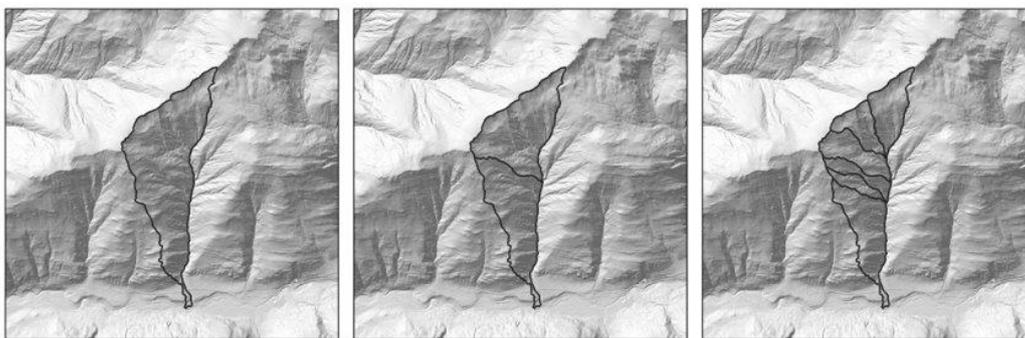


Figura 9. Slope Units coherentes. De izquierda a derecha, N1, N2 y N3.

Todas las partes del procesado se llevaron a cabo mediante el software abierto QGIS 3.10.6, que incorpora en su interfaz los algoritmos hidrológicos del software GRASS GIS necesario para las operaciones principales. Los pasos de procesamiento se sintetizan en el siguiente flujo de trabajo (Figura 10).

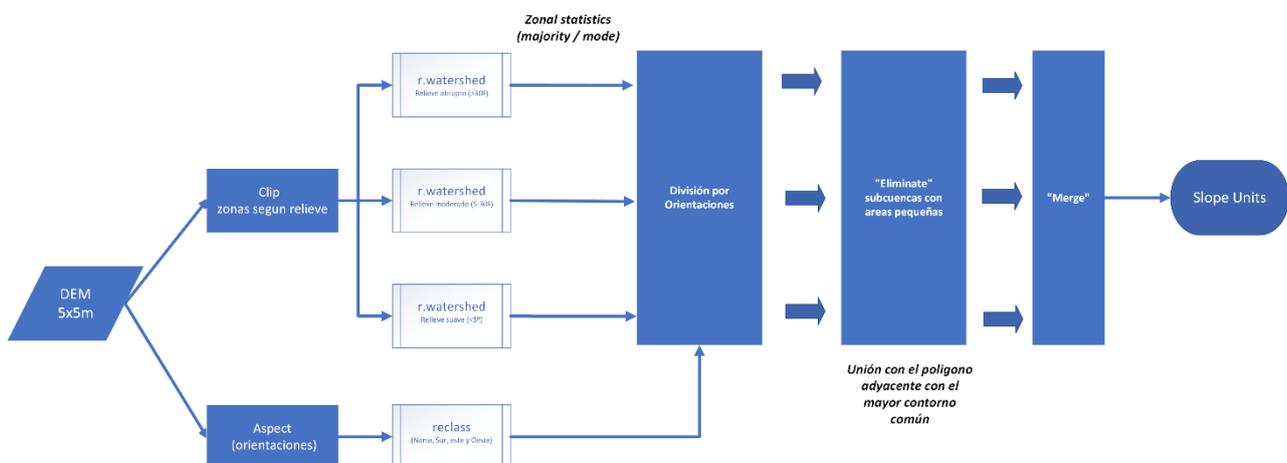


Figura 10. Flujo completo de procesado.

3. RESULTADOS

El resultado final consta de tres coberturas continuas de unidades de ladera para todo el territorio de Cataluña con diferentes niveles de detalle coherentes entre ellos. En las siguientes imágenes de las coberturas completas se identifican las diferentes zonas de relieve y las diferentes densidades de unidades según esta zonificación y los tres niveles de detalle.

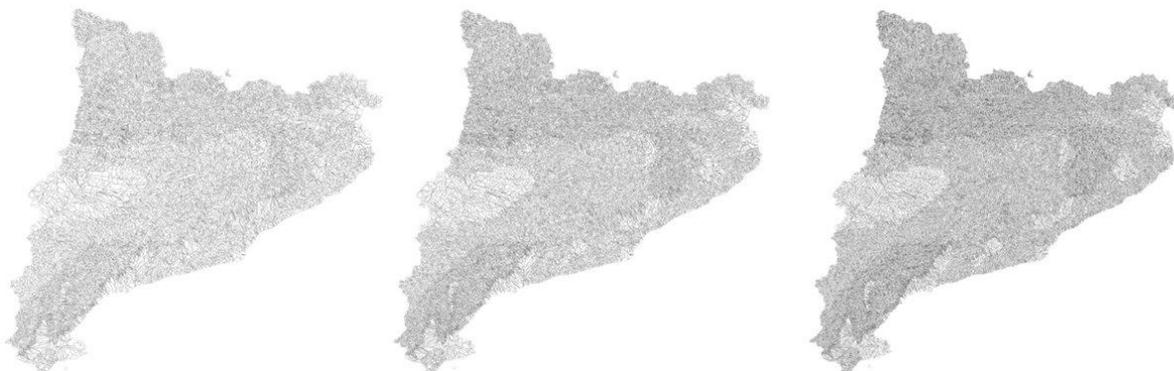


Figura 11 Coberturas completas de nivel N1, N2 y N3.

En la (**Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**) se muestra una comparativa de los tres niveles de detalle para una misma zona de interés, donde se otorga una idea de la magnitud general de las unidades que conforman cada cobertura.

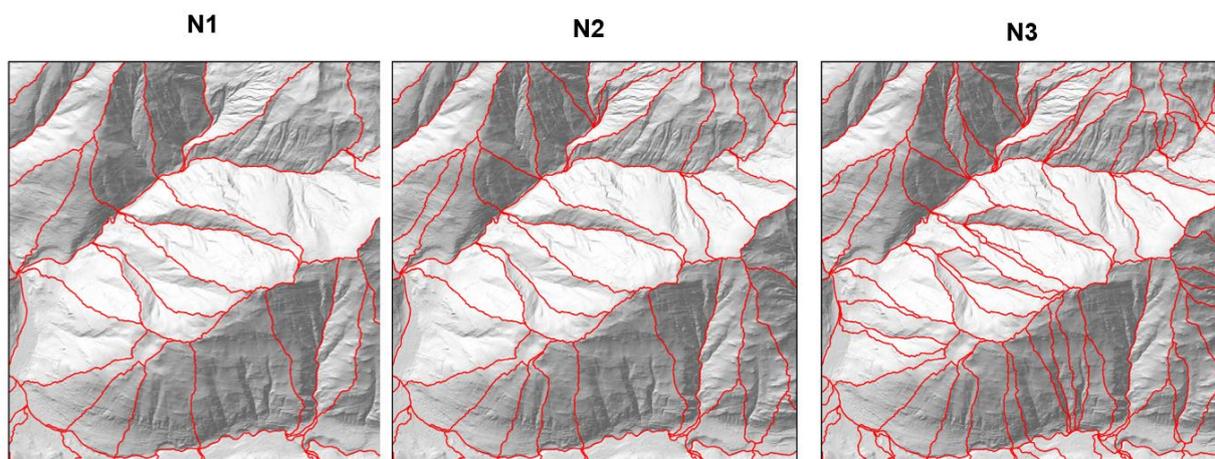


Figura 12.- Comparativa de los diferentes niveles de detalle

Por último, en la siguiente tabla se especifica el número total de unidades de vertiente generadas por nivel, observándose una aproximada duplicación en cada disminución de nivel de detalle Tabla 2.

Nivel de detalle	Nº Unidades de ladera	Factor de detalle
N1	16.630	
N2	32.089	1,93 x N1
N3	62.717	1.95 x N2

Tabla 2. Número de unidades de vertiente por nivel de detalle.

REFERENCIAS

- Alvioli, M., Guzzetti, F. & Marchesini, I., 2020. Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy. *Geomorphology*, Volum 358.
- Alvioli, M. et al., 2016. Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geoscientific Model Development*, IX (11), pp. 3975-3991.
- Amato, G., Eisank, C., Castro-Camilo, D. & Lombardo, L., 2019. Accounting for covariate distributions in slope-unit-based landslide susceptibility models. A case study in the alpine environment. *Engineering Geology*, Volum 260.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. & Reichenbach, P., 1995. GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. A: Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Dordrecht: Springer, pp. 135-175.
- Guzzetti, F., Cardinali, M. & Reichenbach, P., 1996. The Influence of Structural Setting and Lithology on Landslide Type and Pattern. *Environmental and Engineering Geoscience*, II(4), pp. 531-555.
- Guzzetti, F. et al., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1-2), pp. 166-184.
- ICC, 2013 Model d'Elevacions del Terreny de Catalunya 5x5metres (MET-5) v1.0 Especificacions tècniques *Versió 2.0 Juny 2013*
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2016. Subcuencas de ríos completos clasificadas según Pfafstetter modificado (Ámbito Nacional), Madrid: s.n.
- Reichenbach, P. et al., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, Volum 180, pp. 60-91.
- Sun, X. et al., 2020. Landslide susceptibility mapping along the upper Jinsha River, south-western China: a comparison of hydrological and curvature watershed methods for slope unit classification. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature.
- Wang, F. et al., 2017. Application of a gis-based slope unit method for landslide susceptibility mapping along the longzi river, southeastern tibetan plateau, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, VI(6).
- Yu, C. & Chen, J., 2020. Application of a gis-based slope unit method for landslide susceptibility mapping in helong city: Comparative assessment of icm, ahp, and rf model. *Symmetry*, XII(11), pp. 1-21.