

CARTOGRAFÍA SEMI-AUTOMÁTICA DE TERRAZAS DE CULTIVO A PARTIR DE DATOS LIDAR

E. Arnau-Rosalén¹, A. Calsamiglia², A. Calvo-Cases¹, J. Estrany³ y E. Symeonakis⁴

¹Departament de Geografia, Universitat de València. eva.arnau@uv.es; adolfo.calvo@uv.es

²Institut de Recerca Agroambiental i d'Economia de l'Aigua (INAGEA), Universitat de les Illes Balears. aleix.calsamiglia@gmail.com; joan.estrany@uib.cat

³Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears.

⁴School of Science & Environment, Manchester Metropolitan University. e.symeonakis@mmu.ac.uk

RESUMEN

Los sistemas montañosos del Mediterráneo han sido modificados por la actividad agraria, especialmente con la construcción de terrazas de cultivo. Estas modifican la topografía y la distribución de los suelos, y, en consecuencia, la dinámica hidrológica y erosiva de las cuencas. El abandono de estas terrazas de cultivo durante la segunda mitad del siglo XX ha supuesto un proceso de forestación y por tanto incendios forestales. Además, el abandono puede perpetuar el colapso de estos muros. La combinación de incendios y colapsos conduce a la activación de procesos de erosión acelerada de los suelos. Las actuales fuentes de datos topográficos –como el LiDAR aerotransportado– y herramientas de análisis de imagen, ofrecen una buena resolución espacial para extraer detalles de las formas del relieve como los escalonamientos de las terrazas. Este trabajo explora las posibilidades de estas fuentes de datos y herramientas en su aplicación para la cartografía detallada de las terrazas, tanto en cultivos actuales como abandonados. Se han seleccionado dos cuencas de drenaje situadas en Mallorca y Castelló, como ejemplos característicos de este tipo de formas y, a partir de LiDAR se ha aplicado un procedimiento de resultados satisfactorios. La cartografía obtenida se ha contrastado con fotointerpretación y trabajo de campo, al tiempo que se ha explorado la influencia de las terrazas sobre los procesos de erosión, estudiando la conectividad estructural del flujo de sedimentos a partir del Índice de Conectividad (IC).

Palabras clave: Cartografía de terrazas de cultivo; LiDAR; Conectividad; procesos erosión; Mediterráneo

ABSTRACT

The mountain systems surrounding the Mediterranean suffered a huge transformation related with the agriculture, mainly as a consequence of the agricultural terraces construction. These structures modify the topography and soils distribution, and, as a consequence, the drainage basins hydro-erosive dynamics. The massive land abandonment especially during the second half of the 20th century conducted to an afforestation associated with the occurrence of wild fires. The combination of fires and the collapse of the terraces walls has accelerated soil erosion processes. Actual sources of topographical data –mainly the airborne LiDAR- and the image analysis tools, offers an adequate resolution to get the land surface elements patterns and map landforms such terrace steps. This paper explores the possibilities of such data sources and tools and pretends mapping the terrace walls both active and abandoned for the agricultural practices. Two small catchments have been selected in Mallorca and Castelló as samples characterised by the massive presence of agricultural terraces and using airborne LiDAR data has applied a procedure that produced satisfactory results. The maps have been check by means of photointerpretation and field work, and an exploratory work has been done analysing the influence of the terraces over the erosion processes by means of the study of the structural connectivity applying to the DTMs a Connectivity Index (IC).

Keywords: Agricultural terrace mapping; LiDAR; Erosion processes; Connectivity; Mediterranean

1. INTRODUCCIÓN

Las terrazas de cultivo, morfológicamente, están formadas por un muro o talud de altura variable y pendiente próxima a la vertical, que bordea por la parte inferior a un rellano, producido por relleno de sedimentos, con pendiente casi horizontal. Desde el punto de vista de los procesos de erosión, las terrazas implican modificación de los flujos de agua y sedimentos en las laderas y vaguadas donde se han construido. Además de factores ligados a las propiedades de los suelos y de los componentes de la superficie, especialmente vegetación, el brusco descenso de la pendiente implica una pérdida de energía de la arroyada superficial, que conlleva a la deposición parcial de la carga sedimentaria y promueve la infiltración del agua. Por tanto, las terrazas de cultivo producen una desconexión de los flujos de agua y sedimento que permite, como es su objetivo inicial, la conservación del suelo.

Ante el progresivo deterioro de estas estructuras por el creciente abandono de la agricultura, especialmente en zonas periféricas, se precisan metodologías eficientes para su correcta representación cartográfica, así como en la evaluación del estado de conservación de los muros de contención de suelo. Hasta el momento son múltiples los trabajos dedicados a la detección automática de terrazas de cultivo aprovechando la creciente disponibilidad de datos VHR (*Very High Resolution*) tanto de imágenes como de productos de información topográfica (Tarolli *et al.*, 2014). Si bien es múltiple la diversidad de fuentes de datos utilizadas en dichos trabajos según el satélite o medio de adquisición utilizado, sí existen dos aproximaciones metodológicas bien diferenciadas: (i) análisis de la información topográfica mediante el cálculo de índices representativos (Bailly *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2011; Rutzinger *et al.*, 2012; Bailly y Levasseur, 2012; Sofia *et al.*, 2016; Chu *et al.*, 2017) y (ii) la utilización de sistemas de clasificación jerárquicos multinivel (OBIA: *Object Based Image Analysis*) que permiten el uso combinado de imágenes multiespectrales con la información topográfica (Karydas y Gitas, 2011; Díaz-Varela *et al.*, 2014; Eckert *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017). Independientemente del método, la componente topográfica es imprescindible en la detección en el caso de la extracción automática de los muros de las terrazas de cultivo.

Los medios topográficos desarrollados recientemente, fundamentalmente el *Laser Scanner* y la fotogrametría de alta resolución (especialmente la *Structure from Motion* –SfM), están poniendo a disposición del estudio de procesos geomorfológicos modelos digitales de elevaciones y del terreno (DEM/DTM) con una resolución espacial suficiente para permitir la medida de la rugosidad de la superficie terrestre y, por tanto, avanzar más allá de la sola consideración de la inclinación media y longitud de la pendiente como variables (Westoby *et al.*, 2012; Rychkov *et al.*, 2012; Tarolli, 2014). Algunos de estos medios, incluso están permitiendo el estudio de los cambios temporales en las geoformas (análisis 4D) casi en tiempo real, hecho que puede enriquecer el estudio de procesos considerablemente en las ciencias de la Tierra y afines.

Este trabajo pretende un avance en la identificación y cartografía de las terrazas de cultivo a partir de datos públicos, producidos y difundidos por las administraciones, que pese a su menor resolución frente a otros medios comerciales (productos fotogramétricos derivados de pares estereoscópicos de satélites comerciales VHR como GeoEye-1 o Pleiades) o autónomos (UAV: vehículos aéreos no tripulados), proporcionan una fuente de datos ya disponible con una cobertura espacial completa en el territorio. Concretamente partimos de los datos LiDAR (laser scanner aerotransportado) producidos por el Institut Cartogràfic Valencià (ICV), el Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears (SITIBSA) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN), y disponibles para descarga en el CNIG (<http://centrodedescargas.cnig.es>).

Asimismo, en el procesado de datos se pretende el desarrollo de una metodología que sea replicable con herramientas habituales utilizadas en entornos SIG.

Con el fin de avanzar en el estudio de la relación de las terrazas con los procesos de erosión y del estado de degradación de éstas, aunque no es el objetivo principal de este trabajo, se busca analizar la influencia de la presencia de muros y su conservación sobre la conectividad estructural de las cuencas. Para el cálculo de la conectividad estructural se ha usado el Índice de Conectividad (IC) desarrollado por Borselli *et al.* (2008) y con las modificaciones de Cavalli *et al.* (2013) que permiten maximizar el potencial que actualmente ofrecen los DTM de alta-resolución. Este índice modeliza las rutas de sedimento y es implementado mediante procedimientos de SIG.

2. ÁREAS DE ESTUDIO

Se seleccionaron como muestra dos cuencas (Figura 1) semejantes en tamaño y usos del suelo (ver Tabla 1) situadas, la primera, el Barranc de Tena, en la cabecera de la Rambla de Atzeneta (Castelló) y la segunda, el Torrent de Sa Murtera, en la cabecera del Torrent de Sa Font de la Vila (Mallorca).

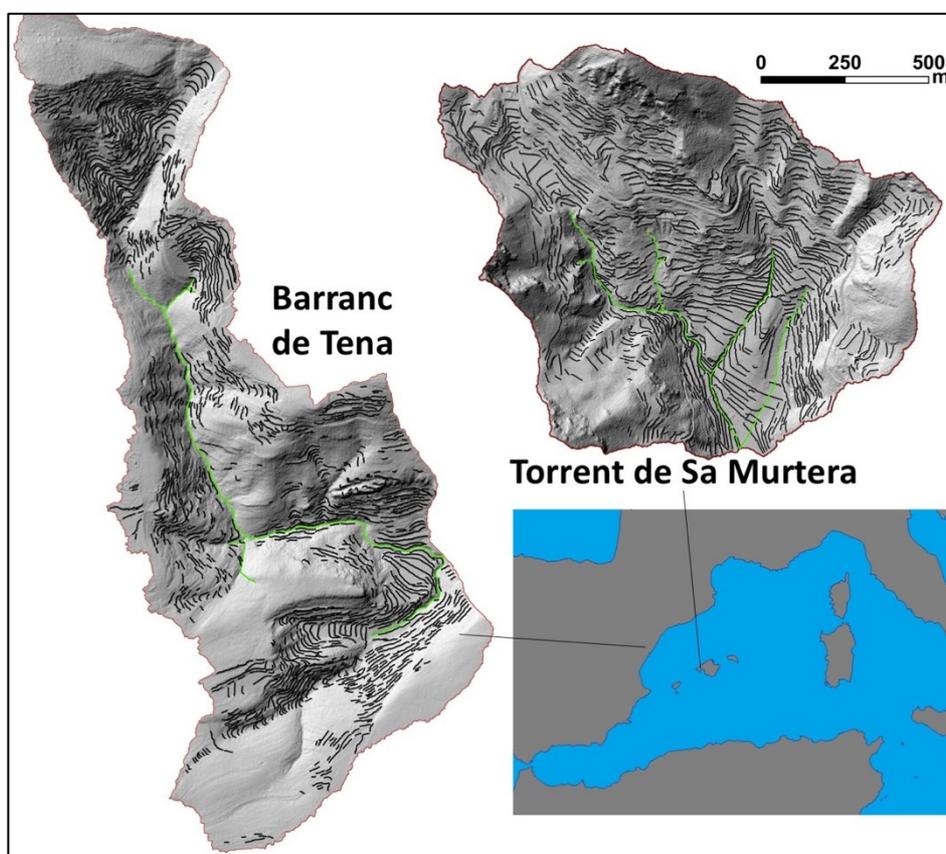


Figura 1. Situación y relieve de las cuencas de estudio. Líneas en negro corresponden a los aterrazamientos.

Tabla 1. Características generales de las cuencas de estudio y propiedades del LiDAR

	Barranc de Tena	Torrent de Sa Murtera
Superficie (ha)	163,8	163,5
Altitud máxima (m)	945,7	516,5
Altitud mínima (m)	600,3	180,8
Altitud media (m)	760,8	302,9
Pendiente media (°)	17,7	20,5
Densidad media del LiDAR (p m ⁻²)	0,98	1,32
RMSE Z (m)	< 0,2	< 0,2

Ambas cuencas están excavadas en litología calcárea, fundamentalmente, y en años anteriores a los vuelos LiDAR han estado afectadas por sendos incendios forestales. El Barranc de Tena en 2007 y Sa Murtera en 2013 y en parte también en 1994 (ver García-Comendador *et al.*, 2017; Calsamiglia *et al.*, 2018). La actividad agrícola, completamente ubicada en terrazas de cultivo, aún continúa en parte de las cuencas.

3. METODOLOGÍA

Los vuelos LiDAR proporcionados por CNIG, cuyas propiedades se detallan en la tabla 1, datan de 2009 para la Comunitat Valenciana y de 2014 los de Illes Balears.

La utilización de datos LiDAR lleva asociado un protocolo técnico y de pre-procesado para la obtención de los correspondientes Modelos Digitales del Terreno que determina la naturaleza de lo representado (con o sin filtrado de la vegetación), así como de control de calidad de los datos mediante la distribución espacial de la densidad de puntos obtenidos en el vuelo por unidad de superficie y la densidad de puntos resultante tras el filtrado. La densidad de puntos a partir de la cual se construye el Modelo Digital del Terreno final es una variable “local” en toda la imagen, y está determinado por la propia distribución de la vegetación.

Los procedimientos seguidos se han sintetizado en la figura 2. Un aspecto crítico de esta implementación metodológica es la preclasificación de los puntos LiDAR. En muchos casos algunos puntos de los escalones de las terrazas vienen clasificados como plantas, pero no se han modificado las clases para mantenernos en el principio de mínima modificación de la información

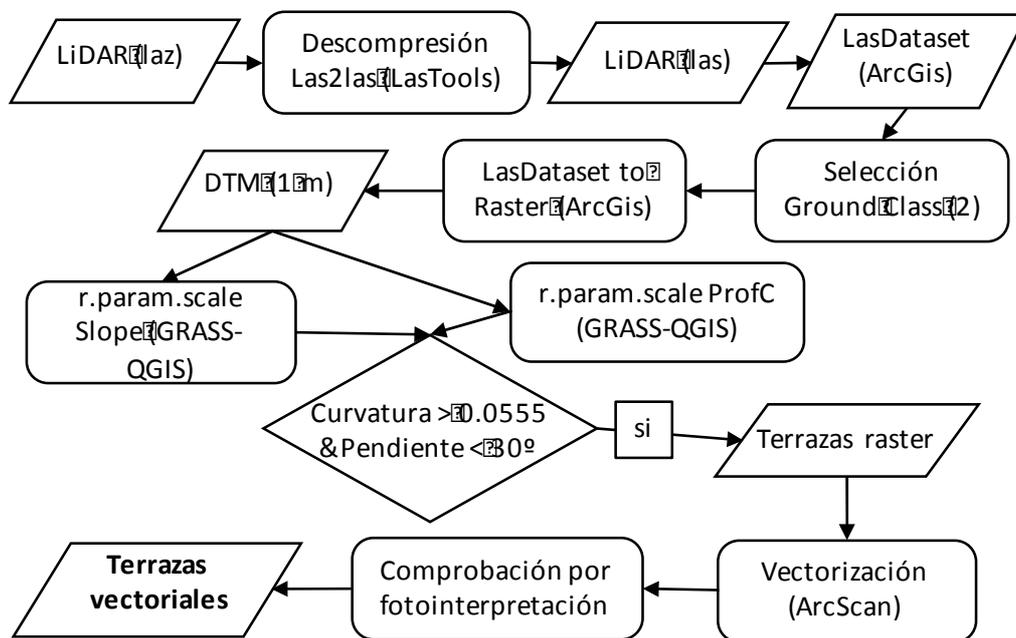


Figura 2. Diagrama de flujo de los procesos utilizados y mapas resultantes

Manteniendo este criterio se han construido los correspondientes DTM considerando los puntos preclasificados como suelo (Clase 2) forzando hasta una resolución de 1 m, utilizando LasDataset to Raster de ArcGIS 10.2, con asignación de celdas por IDW e interpolación lineal de los huecos.

A partir de estos DTM se cartografiaron los elementos convexos de la superficie, según la curvatura en el sentido de la máxima pendiente. Para ello se han obtenido los mejores

resultados con la función *r.param.scale* (GRASS 7 / QGIS 18.2; Tolerancia pendiente 5, Tolerancia curvatura 0.0001, Ventana de proceso 5, Parámetro morfométrico 'profC'). Tras una exploración visual de las imágenes resultantes (Figura 3A) sobre ortofotografías y el DTM sombreado, se ha resuelto, tras comprobación visual, que el valor de curvatura umbral que mejor definía las terrazas en ambas cuencas de estudio es 0,0555 (Figura 3B), por lo que se han enmascarado los valores inferiores y obtenido un primer mapa de bordes de terrazas. Este mapa, incluía en ambas cuencas todas las terrazas identificables, pero también otras formas geoméricamente asimilables como cantiles, taludes de carretera, edificaciones y algunos escalones introducidos por plantas mal clasificadas en el LiDAR. Para eliminar los escalones obtenidos en áreas de mucha pendiente, dominadas en ambas cuencas por cantiles, y en las que se ha constatado que no existían terrazas, al menos conservadas y visibles, se ha aplicado un filtro de pendientes superiores a 30° obtenidas con la función *r.param.scale* (GRASS 7 / QGIS 18.2. Tolerancia pendiente 5, Tolerancia curvatura 0.0001, Ventana de proceso 15, Parámetro morfométrico 'slope').

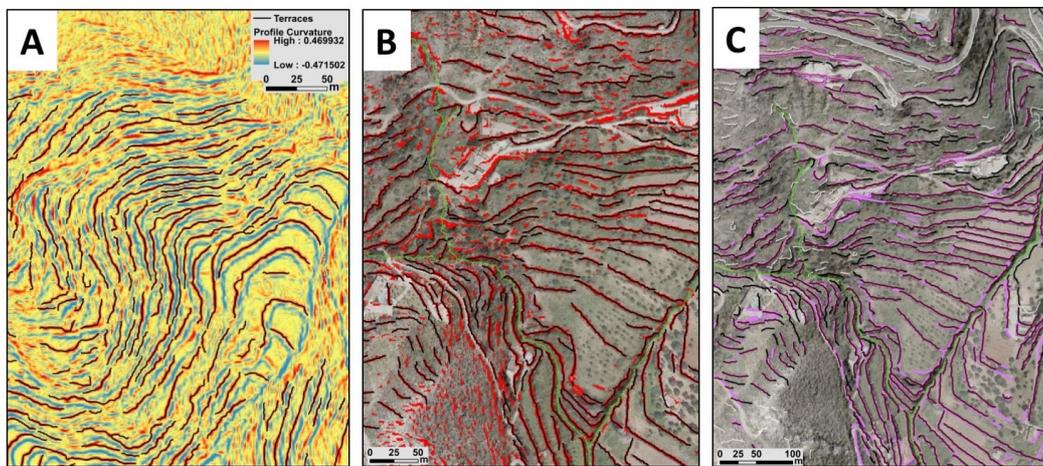


Figura 3. Proceso de identificación de las terrazas: (A) Mapa de curvatura en perfil (*r.param.escale*), con las terrazas identificadas superpuestas en negro, en un sector del Bc. de Tena. (B) Umbral de curvatura > 0.0555 (en rojo) y terrazas superpuestas (en negro), en una sector de Sa Murtera. (C) Mapa final de terrazas, en negro superpuesto a la cartografía previa por fotointerpretación (fucsia).

El mapa resultante se ha vectorizado con ArcSan (ArcGis 10.2), configurado con los siguientes parámetros: Insertion solution Median, Maximum line width 6, Noise level 80, compression tolerance 0.05, Smoothing weight 1, Gap closure tolerance 2, Fan angle 30, Hole Size 30.

Posteriormente se han revisado los resultados y eliminado manualmente los vectores no coincidentes con evidencias de terrazas de cultivo; fundamentalmente correspondientes a los taludes de carreteras y caminos, edificaciones y algunos afloramientos rocosos dispersos y pequeños.

La evaluación de la calidad de los resultados se ha realizado en Sa Murtera por solape de la verdad terreno (*ergo*, cartografía previa de muros de las terrazas de cultivo) con los resultados y midiendo su grado de correspondencia dentro de un área de influencia o *buffer* (Heipke *et al.*, 1997; Sofia *et al.*, 2016; Eckert *et al.*, 2017), en nuestro caso de 4 m a cada lado. En la Cuenca de Tena se ha realizado una inspección visual sobre ortofotografía y DTM sombreado.

A partir de los MDT utilizados para la cartografía de las terrazas se ha calculado el Índice de Conectividad (IC de Cavalli *et al.*, 2013) mediante la aplicación *SedInConnect* v2.3 descrita en Crema y Cavalli (2018). Este índice estima a partir del DTM la capacidad de que los flujos de sedimentos que llegan a un pixel sean transmitidos aguas abajo, considerando como factores

para la llegada de sedimentos el área de drenaje del pixel, la pendiente de dicha área y la rugosidad, mientras que la transmisión aguas abajo depende de la distancia al nivel de base y la pendiente y rugosidad de ese recorrido. Para minimizar las desigualdades en el resultado según partes de las cuencas analizadas como consecuencia de la proximidad del nivel de base local se ha utilizado como punto de referencia el final de las cuencas principales, a las que pertenecen las subcuencas estudiadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El MDT resultante tras la exclusión de los puntos preclasificados como vegetados en los datos originales del LiDAR sitúa en dirección ladera arriba el escalón, aspecto que es más acentuado en algunas partes del Bc. de Tena, donde, además es menor la densidad de puntos. De hecho, tras la obtención de las terrazas se ha comprobado la densidad de puntos de suelo medida en una banda de 4 metros a cada lado de las líneas obtenidas como terrazas y ha sido de $0,36 \text{ p m}^{-2}$ en Tena y de $0,45 \text{ p m}^{-2}$ en Sa Murtera, sobre unas densidades, considerando todos los puntos, de $0,98$ y $1,32 \text{ p m}^{-2}$, en cada cuenca, respectivamente (Tabla 1).

Esta densidad obtenida es relativamente baja respecto de la mínima recomendable para generar un DTM de 1m de resolución (Thomas *et al.*, 2017). Sin embargo la necesidad de representar elementos de orden métrico como son las terrazas y las evidencias de campo que validan el uso de bajas densidades para este propósito (Calsamiglia *et al.*, 2018) ha justificado la generación de DTM de 1 m de resolución en este trabajo.

La cartografía de muros y/o taludes de terrazas de cultivo obtenida con esta metodología se ha comparado en el Torrent de Sa Murtera (detalle en Figura 3C) con las terrazas previamente digitalizadas por Calsamiglia *et al.* (2018). De los 910 tramos de muro digitalizados (36,21 km), 858 (31,37 km) son coincidentes dentro de un buffer de 8 m de ancho construido sobre las líneas digitalizadas. La coincidencia es de 94,29% en tramos y 86,63% en longitud. El procedimiento semiautomático utilizado ha añadido algunas terrazas a las entonces digitalizadas, que se han constatado como tales en la comprobación visual con ortofotografías y sombreado del DTM, tratándose de muros muy deteriorados y cubiertos por vegetación.

En total se ha cartografiado por el procedimiento aquí expuesto, en Sa Murtera 41,76 km (1061 tramos) considerados como válidos. En la cuenca del Bc. De Tena la comprobación de resultados se ha realizado exclusivamente por inspección visual. Constatándose que el procedimiento semiautomático ha descartado pocas terrazas; aquí se han obtenido un total de 1415 tramos, que suponen 47,83 km de muros.

Si bien son difíciles de comparar estrictamente de manera genérica por la diferente metodología de evaluación, la calidad del resultado obtenido en comparación con otros autores y metodologías es satisfactoria en la medida que iguala e incluso incrementa el porcentaje de acierto (Karydas *et al.*, 2011 entorno al 50%; Bailly *et al.*, 2008 del 70%; Bailly y Levavasseur, 2012 hasta un 87%). Son escasos los autores que disponen de la verdad terreno cartografiada como elementos lineales, imposibilitando la comparación en los términos que aquí se realiza de comparar longitudes de acierto vs. tramos de acierto (Sofia *et al.*, 2016 entorno al 80%; Eckert *et al.*, 2017, con un 78,5%; Zhao *et al.*, 2017 entre el 89 y el 94%; Chu *et al.* del 74%). Por ejemplo, Díaz-Varela *et al.* (2014) obtiene un 90% de precisión global, si bien la validación la realiza con la aproximación clásica utilizando puntos aleatorios, lo que puede sobreestimar la calidad de los resultados.

Con el fin de conocer la influencia de las terrazas sobre los procesos de erosión y cómo el potencial erosivo de diferentes partes de la cuenca puede afectar a las terrazas, se han superpuesto las capas de terrazas a los mapas del Índice de Conectividad (IC) (Figura 4). El índice mide a partir del DTM la capacidad de que los flujos de sedimentos que llegan a un pixel sean

transmitidos aguas abajo, considerando como factores para la llegada de sedimentos el área de drenaje del pixel, la pendiente de dicha área y la rugosidad, mientras que la transmisión aguas abajo depende de la distancia al nivel de base y la pendiente y rugosidad de ese recorrido.

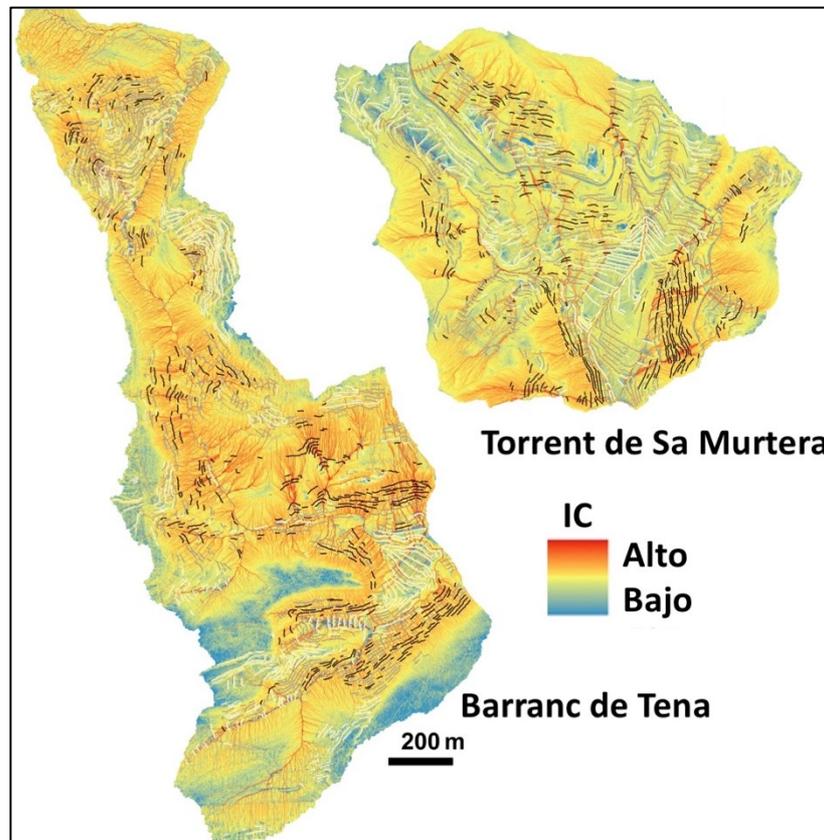


Figura 4. Mapa del Índice de Conectividad (IC de Cavalli *et al.*, 2013) calculado para la salida de las cuencas principales a las que pertenecen la de estudio y superposición de las terrazas cartografiadas, en blanco, gris o negro, según promedio del IC en la banda superior al muro bajo, medio o alto respectivamente (ver texto).

Los resultados del índice pueden variar entre $-\infty$ y $+\infty$, , indicando por valores más altos, una mayor conectividad. Puesto que la magnitud del índices puede estar afectada tanto por el tamaño de celdas del DTM (ver Cantreul *et al.*, 2017) como por el de las cuencas, se han buscado cuencas y subcuencas de dimensiones similares y DTM de igual resolución para que los rangos de valores del índice puedan ser comparables entre áreas de estudio. La tabla 2 resume los principales parámetros de cada cuenca, que resultan estar relacionados con propiedades morfológicas generales de éstas. Así, por ejemplo, la cuenca de Tena tiene menor conectividad media por la influencia de las plataformas calcáreas en las cumbres, pero presenta una mayor variabilidad porque el resto de las laderas están mucho más conectadas.

La distribución espacial de los valores de IC, en relación a las terrazas, muestra una mayor eficiencia de las terrazas en desconectar los flujos de arroyada superficial allí donde estas son más amplias y mejor conservadas, fundamentalmente en los fondos de valle y especialmente en Sa Murtera, destacando la presencia de albarradas. Mientras que muchos de los muros de terraza en laderas abruptas son cruzados por líneas de elevada conectividad; lo cual puede estar relacionado con el grado de deterioro de los muros y/o el nivel de riesgo de erosión de estas paredes (Calsamiglia *et al.*, 2018). La figura 4 muestra superpuesto al IC los valores promedio de este en una banda de 3 m aguas arriba de los muros (de blanco a negro según aumenta la conectividad media tras el muro) y la tabla 2 los estadísticos de las medias del conjunto de

terrazas; observándose en Sa Murtera un menor riesgo o estado de deterioro de los muros, asociado a la mayor abundancia de terrazas amplias en los fondos de valle y pervivencia de estructuras de drenaje de los campos.

Tabla 2. Resumen de los valores del IC en ambas cuencas y en los 3 m superiores de cada terraza cartografiada

		Tena	Sa Murtera
Cuenca	IC max	-3,54	-2,18
	IC min	-8,08	-7,17
	IC media	-5,99	-4,85
	IC CV%	-7,16	-9,17
Terrazas	IC max	-5,27	-4,19
	IC min	-6,91	-6,09
	IC media	-6,01	-4,96
	IC CV%	-3,62	-5,16

5. CONCLUSIONES

Los datos LiDAR del PNOA-CNIG se han mostrado suficientes para el objetivo perseguido, aunque no hay que olvidar que se trata de áreas que sufrieron incendios forestales anteriores a los vuelos LiDAR y, por tanto, con una mayor densidad de puntos en la clase suelo.

El procedimiento utilizado ha permitido cartografiar la práctica totalidad de las terrazas de cultivo de las cuencas de estudio, aunque la existencia de puntos LiDAR no correctamente clasificados conduce a su desplazamiento hacia el interior de las terrazas, especialmente en el Bc. de Tena, con menor densidad de puntos. Aunque el procedimiento y parametrización empleados digitaliza en exceso, fundamentalmente otros escalones debidos a las carreteras y caminos y a afloramientos rocosos, supone un importante ahorro de tiempo en la cartografía de las terrazas, aplicable allí donde los datos LiDAR correspondientes a suelo tengan una densidad suficiente y la altura de las terrazas sea bastante más elevada que el RMSE Z de los datos LiDAR.

En combinación con indicadores del potencial erosivo, como lo es el IC utilizado, se abren perspectivas a la identificación de los lugares con mayor riesgo de erosión por el colapso de los muros y deterioro de las infraestructuras.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bailly, J. S. y Levavasseur, F. (2012). Potential of linear features detection in a Mediterranean landscape from 3D VHR optical data: Application to terrace walls. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 7110–7113.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352024>

Bailly, J. S., Lagacherie, P., Millier, C., Puech, C. y Kosuth, P. (2008). Agrarian landscapes linear features detection from LiDAR: Application to artificial drainage networks. *International Journal of Remote Sensing*, 29(12), 3489–3508. <https://doi.org/10.1080/01431160701469057>

Borselli, L., Cassi, P. y Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>

- Calsamiglia, A., Fortesa, J., García-Comendador, J., Lucas-Borja, M.E., Calvo-Cases, A. y Estrany, J. (2018). Spatial patterns of sediment connectivity in terraced lands: Anthropogenic controls of catchment sensitivity. *Land Degrad. Dev.*, 29, 1198–1210. <https://doi.org/10.1002/ldr.2840>
- Cantreul, V., Bielders, Ch., Calsamiglia, A. y Degré, A. (2017). How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.4295>
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. y Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Chu, H.-J., Huang, M.-L., Tain, Y.-C., Yang, M.-S. y Höfle, B. (2017). Historic Low Wall Detection via Topographic Parameter Images Derived from Fine-Resolution DEM. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11), 346. <https://doi.org/10.3390/ijgi6110346>
- Crema, S. y Cavalli, M. (2018). SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Computers and Geosciences* 111, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>
- Diaz-Varela, R. A., Zarco-Tejada, P. J., Angileri, V. y Loudjani, P. (2014). Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle. *Journal of Environmental Management*, 134, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.006>
- Eckert, S., Tesfay Ghebremicael, S., Hurni, H. y Kohler, T. (2017). Identification and classification of structural soil conservation measures based on very high resolution stereo satellite data. *Journal of Environmental Management*, 193, 592–606. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.061>
- García-Comendador, J., Fortesa, J., Calsamiglia, A., Calvo-Cases, A. y Estrany, J. (2017). Post-fire hydrological response and suspended sediment transport of a terraced Mediterranean catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.4181>
- Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., Jamet, O., Sensing, R. y Jamet, O. (1997). Evaluation of Automatic Road Extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(3-4W2), 47–56. <https://doi.org/10.1.1.30.7686>
- Karydas, C. G. y Gitas, I. Z. (2011). Development of an IKONOS image classification rule-set for multi-scale mapping of Mediterranean rural landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24), 9261–9277. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.551549>
- Martin, R., Bernhard, H., Michael, V. y Norbert, P. (2011). Digital terrain models from airborne laser scanning for the automatic extraction of natural and anthropogenic linear structures. *Developments in Earth Surface Processes*, 15(June), 475—488. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53446-0.00018-5>
- Rutzinger, M., Höfle, B. y Kringer, K. (2012). Accuracy of automatically extracted geomorphological breaklines from airborne lidar curvature images. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 94(1), 33–42. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00453.x>
- Sofia, G., Bailly, J. S., Chehata, N., Tarolli, P. y Levavasseur, F. (2016). Comparison of Pleiades and LiDAR Digital Elevation Models for Terraces Detection in Farmlands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4), 1567–1576. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2516900>
- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295–312. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.008>

Tarolli, P., Preti, F. y Romano, N. (2014). Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. *Anthropocene*, 6, 10–25.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.03.002>

Thomas, I.A., Jordan, P., Shine, O. Fenton, O., Mellander, P.E., Dunlop, P. y Murphy, P.N.C. (2017). Defining optimal DEM resolutions and point densities for modelling hydrologically sensitive areas in agricultural catchments dominated by microtopography, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54, 38-52.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.08.012>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. y Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Zhao, H., Fang, X., Ding, H., Josef, S., Xiong, L., Na, J. y Tang, G. (2017). Extraction of Terraces on the Loess Plateau from High-Resolution DEMs and Imagery Utilizing Object-Based Image Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(6), 157.
<https://doi.org/10.3390/ijgi6060157>