



## AUTOMATIC GENERATION OF TOPOLOGICALLY CONNECTED GULLY NETWORKS FOR INTEGRATED EROSION CONTROL IN HIGH SLOPE OLIVE ORCHARDS

Adolfo Peña<sup>1\*</sup>, Paula González Garrido<sup>1</sup>, Ana María Laguna<sup>2</sup> and Antonio Miguel Gámiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Rural Engineering, Civil Engineering and Engineering Projects. ETSIAM. University of Córdoba, Edif. Leonardo Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: [ir1peala@uco.es](mailto:ir1peala@uco.es), [z82gogap@uco.es](mailto:z82gogap@uco.es), [g62gafua@uco.es](mailto:g62gafua@uco.es), web: <https://www.uco.es/investiga/grupos/agr-127/>

<sup>2</sup>Department of Applied Physics. ETSIAM. University of Córdoba, Edif. Leonardo Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: [fa1lalu@uco.es](mailto:fa1lalu@uco.es), web: <https://www.uco.es/investiga/grupos/agr-127/>

### **Abstract (EGU)**

The severe erosion problems affecting large areas of olive groves on slopes in Andalusia (Spain), which exceed losses of 400 Mg ha<sup>-1</sup> in extreme rainfall events, require integrated management of the watersheds occupied by these olive groves, which must be coordinated between the competent institutions and landowners since, at present, work is done at farm level, which is a major drawback because the problem is only partially addressed.

These olive groves face problems related to the loss of soil and nutrients, erosion and the hydrological cycle, which affect productivity, yields, economic and environmental sustainability and their impact on riparian ecosystems, the clogging of reservoirs or flooding downstream of the basin that can affect infrastructures and the civilian population.

In this work, actions have been developed to work with a group of farmers, in two selected pilot basins in Cordoba and Jaen, who apply innovative and integrated measures in a collaborative way with other landowners, to contribute to a reduction in erosion and sedimentation levels, greater sustainability and yield of crops and their products, as well as a lower impact on the environment and the basin as a whole, with soil conservation and protection of river ecosystems as the main beneficiaries of the environmental actions implemented.

The innovative proposal has allowed for: (a) Generation of the DEM (Digital Elevation Model) for hydrological modeling of watersheds and determination of gullies and areas vulnerable to erosion; (b) Development of algorithms for a topologically connected network of gullies to establish the areas of origin of soil loss and sediment deposition (c) Protection and correction of ephemeral and deep gullies in pilot plots by means of dikes of modular pieces, vegetation covers in crop roads, protection of roads and vulnerable areas through native plantations, and burying of pruning remains; (d) Monitoring and follow-up of measures from LiDAR sensors on board UAVs and soil analysis before and after extreme events.

These initiatives have already been successfully tested in several projects in which the University of Cordoba participates, such as the CPI INNOLIVAR project and the HIDROLIVAR Operational Group and will be implemented in new study basins where excellent results are expected due to the fragility of steep slope olive groves in very degraded soils.



## **OBTENCIÓN AUTOMÁTICA DE REDES DE CÁRCAVAS TOPOLÓGICAMENTE CONECTADAS PARA EL CONTROL INTEGRADO DE LA EROSIÓN EN OLIVARES DE ALTAS PENDIENTES**

### **Resumen (EGU)**

Los problemas de erosión grave que afectan a grandes superficies de olivar en pendiente en Andalucía, que superan pérdidas de 400 Mg ha<sup>-1</sup> en eventos de precipitación extrema, requieren de un manejo integrado de las cuencas hidrológicas ocupadas por estos olivares, que debe ser coordinado entre las instituciones con competencias y los propietarios de las tierras ya que, actualmente, se trabaja a nivel de parcela, lo que supone un gran inconveniente por abordar el problema de forma parcial.

Estos olivares afrontan problemas relacionados con la pérdida de suelo y nutrientes, la erosión y el ciclo hidrológico, lo que incide en la productividad, los rendimientos, la sostenibilidad económica y medioambiental y su afección sobre los ecosistemas ribereños, la colmatación de embalses o las inundaciones aguas abajo de la cuenca que pueden afectar a infraestructuras y a la población civil.

En este trabajo se han desarrollado acciones para trabajar con un grupo de agricultores, en dos cuencas piloto seleccionadas en Córdoba y Jaén, que aplican medidas innovadoras e integradas de forma colaborativa con otros propietarios, para contribuir a una reducción de los niveles de erosión y sedimentación, una mayor sostenibilidad y rendimiento de las cosechas y sus productos, así como una menor incidencia sobre el medio y el conjunto de la cuenca, con la conservación del suelo y la protección de los ecosistemas fluviales como principales beneficiarios de las acciones ambientales implantadas.

La propuesta innovadora ha permitido: (a) Generación del MDE (Modelo Digital de Elevación) para la modelización hidrológica de las cuencas y determinación de cárcavas y zonas vulnerables de sufrir erosión; (b) Desarrollo de algoritmos para disponer de la red de cárcavas conectada topológicamente que permita establecer las zonas de origen de pérdida de suelo y depósito de sedimentos (c) Protección y corrección de cárcavas efímeras y profundas en parcelas piloto mediante diques de piezas modulares, cubiertas vegetales en calles de cultivo, protección de caminos y zonas vulnerables mediante plantaciones, y enterrado de restos de poda (d) Monitorización y seguimiento de las medidas a partir de sensores LiDAR embarcados en UAV y análisis de suelo, antes y después eventos extremos

Estas iniciativas han sido ya probadas con éxito en diversos proyectos en los que participa la Universidad de Córdoba, como el proyecto de CPI INNOLIVAR y el Grupo Operativo HIDROLIVAR y serán implantadas en nuevas cuencas de estudio en las que se esperan excelentes resultados por la fragilidad de los olivares de fuerte pendiente en suelos muy degradados.



**RESUMEN.** Los problemas de erosión que afectan al olivar en pendiente en Andalucía requieren de un manejo integrado de las cuencas hidrológicas, ya que, actualmente, se trabaja a nivel de parcela, lo que supone un inconveniente por abordar el problema de forma parcial. Los problemas relacionados con la pérdida de suelo y nutrientes, la erosión o el ciclo hidrológico, inciden en la productividad, los rendimientos, la sostenibilidad económica y medioambiental, la colmatación de embalses o las inundaciones aguas abajo. El Grupo Operativo HIDROLIVAR enfoca sus acciones en trabajar con un grupo de agricultores en dos cuencas piloto de Córdoba y Jaén, aplicando medidas innovadoras e integradas con otros propietarios, utilizando la tecnología LiDAR para la generación de modelos hidrológicos que apoyen a la toma de decisiones en campo, contribuyendo a una reducción de los niveles de erosión y una menor incidencia sobre el medio y el conjunto de la cuenca.

**ABSTRACT.** The erosion problems that affect the sloping olive groves in Andalucía require an integrated management of the hydrological basins, since, currently, work is done at the plot level, which is an inconvenience for partially addressing the problem. Problems related to the loss of soil and nutrients, erosion or the hydrological cycle affect productivity, yields, economic and environmental sustainability, the clogging of reservoirs or downstream flooding. The HIDROLIVAR Operational Group focuses its actions on working with a group of farmers in two pilot basins in Córdoba and Jaén, applying innovative and integrated measures with other owners, using LiDAR technology to generate hydrological models that support decision-making in field, contributing to a reduction in erosion levels and a lower impact on the environment and the basin as a whole.

## 1.- Introducción

El olivar abarca 2,75 millones de hectáreas de las cuales 2,55 millones de hectáreas pertenecen a olivar de almazara (93% del total de olivar). El cultivo está presente en 15 de las 17 comunidades autónomas con una distribución centro-sur y este de la península. Andalucía es la mayor región productora con 1,67 millones de hectáreas y concentra, fundamentalmente en Jaén, su tan característico “mar de olivos” (Mapa, 2022). En las últimas décadas, la intensificación a la que los suelos de olivar han estado sometidos ha disminuido significativamente su calidad (Calero et al., 2018). Concretamente, el olivar de zonas de montaña es el que había experimentado mayor incremento en los últimos 20 años (García, 2006; Lima et al., 2019), lo que desemboca en perjuicios ambientales, especialmente en términos de erosión.

La causa principal de estos procesos erosivos es el tipo de laboreo, que elimina la flora adventicia para la competencia por el agua con el cultivo (Espejo-Pérez et al., 2013). Esto origina una fuerte erosión hídrica (la principal causa de la degradación del suelo en el olivar en Andalucía), y, por consiguiente, la pérdida de suelo en los olivares (Cerdà et al., 2010; Gómez et al., 2011), superando los 400 Mg ha<sup>-1</sup> en eventos de precipitación extrema (Vanwalleghem y Giraldez, 2008).

El problema proviene de la erosión hídrica concentrada, que es aquella en que el flujo de agua por la ladera genera inicialmente la aparición de pequeños canales o regueros. En función de las dimensiones de estos regueros y de las implicaciones desde el punto de vista del manejo agrícola, el proceso se clasifica como erosión en surcos o erosión en cárcavas para las de mayor tamaño que difícilmente pueden ser ocultadas cada año. Especialmente compleja desde el punto de vista de su génesis, evolución y restauración, es la erosión en cárcavas (Poesen et al., 2003; Valentín et al., 2005). Todas aquellas prácticas agrícolas que dejan el suelo desprovisto de cobertura vegetal, como el laboreo tradicional o el no-laboreo con suelo desnudo, provocan un incremento de erosión laminar y en surcos. Las cubiertas vegetales, u otras cubiertas inertes como los restos de hoja o poda picada, son los principales aliados del agricultor en el control de la erosión laminar y en surcos (Guzmán-Álvarez et al., 2009).

Por otro lado, y, para estudiar estos procesos erosivos, es necesario conocer la cuenca afectada por los mismos en su totalidad. En este sentido, a partir de los modelos hidrológicos se pueden representar los procesos de lluvia-escurrentía que generan erosión en el terreno para una cuenca determinada.

La modelización hidrológica surge a principios del siglo XIX, pero, no es hasta los años 60 que, con la revolución digital se representa el ciclo hidrológico casi en su totalidad de una cuenca, apareciendo el Standford Watershed Model- SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1995). No obstante, y, debido a que las computadoras eran costosas además de generar procesos muy lentos, la modelización se planteó de forma agregada (Vieux, 2004).

Actualmente, gracias a las nuevas computadoras y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha avanzado significativamente en las técnicas de modelización. En este sentido los MDE (Modelos Digitales de Elevación) son los datos que tienen más importancia para la modelización hidrológica, ya que, se utilizan para predecir fenómenos de inundación basándose en la morfología del terreno (Dwarakish y Ganasri, 2015), (Escobar Villanueva et al., 2019).

La utilización de la tecnología LiDAR para la modelación hidrológica e hidráulica, a través de MDE, proporciona información precisa y detallada de la superficie del terreno y permite una mejor simulación del comportamiento del agua (Mazzoleni et al., 2020).



En este contexto, el estudio llevado a cabo por el Grupo Operativo HIDROLIVAR, tiene como objetivo general mejorar el manejo y la gestión de las cuencas hidrológicas dominadas por el olivar en pendiente mediante una ordenación agro-hidrológica de las mismas y una transferencia de conocimientos y difusión a los agricultores e instituciones afectadas. Esto supone la mejora en la gestión del suelo y del agua. Tras la ordenación, el diseño de medidas y la ingeniería, sigue la ejecución de las tareas en la finca y las buenas prácticas culturales. En el GO HIDROLIVAR participan como socios beneficiarios la Universidad de Córdoba, AMBIENTA Ingeniería y Servicios Agrarios y Forestales y REALIMA; y, como colaboradores, Asaja Córdoba, Asaja Jaén y las cooperativas San Antonio de Obejo y Agrosegura de la Puerta de Segura.

La propuesta innovadora se apoya en estos objetivos específicos:

- Generación del MDE (Modelo Digital del Terreno) mediante la tecnología LiDAR para la modelización hidrológica de las cuencas y determinación de posibles cárcavas y zonas vulnerables de sufrir erosión.
- Protección y corrección de cárcavas efímeras y profundas en parcelas piloto mediante la colaboración con todos los agricultores de las subcuencas a partir de sistemas modulares de automontaje, cubiertas vegetales y paneles de fibrocelulosa.
- Protección de caminos y zonas vulnerables mediante plantaciones, paneles de fibrocelulosa y enterrado de restos de poda.
- Monitorización y seguimiento de las medidas a partir de sensores remotos y análisis de suelo.

Estas iniciativas han sido ya probadas con éxito, en diversos proyectos en los que participa la Universidad de Córdoba, como el proyecto de CPI INNOLIVAR (INNOLIVAR, 2023) y serán implantadas en las cuencas de estudio en las que se esperan excelentes resultados por la fragilidad de los olivares de fuerte pendiente en suelos muy degradados.

## 2.- Material y métodos

### 2.1.- Zona de estudio

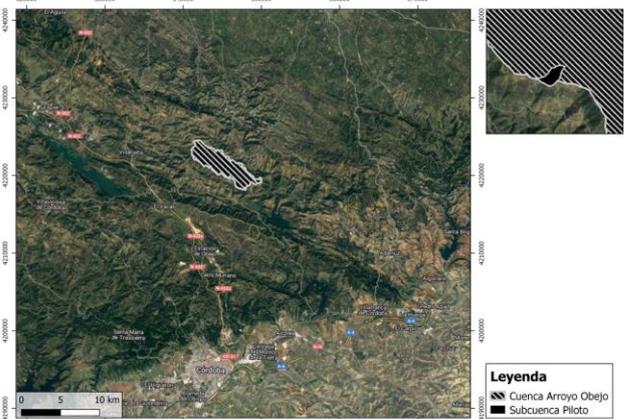
Los trabajos se están llevando a cabo en las cuencas piloto del arroyo Peñolite, en la provincia de Jaén ( $38^{\circ}19'46.9''N$   $2^{\circ}47'30.2''W$ ; Figura 1), y del arroyo Obejo ( $38^{\circ}05'54.6''N$   $4^{\circ}44'03.8''W$ ; Figura 2), de la provincia de Jaén. Las dos cuencas están dominadas por olivar tradicional que se integra en ecosistemas mediterráneos de alto valor natural. Concretamente, se ha trabajado en parcelas seleccionadas dentro de las cuencas gracias a la colaboración con las cooperativas y los propietarios de las mismas, trabajando a nivel de cuenca y aplicando el enfoque holístico del proyecto.

La subcuenca piloto del arroyo de Peñolite ( $38^{\circ}20'27.23''N$   $2^{\circ}47'47.18''W$ ; Figura 1), tiene un área de 19,56 ha, está formada por 15 parcelas que pertenecen a 13 propietarios distintos y presenta una cárcava de 72 metros de longitud y 2 metros de profundidad media.

La subcuenca piloto del arroyo de Obejo, ( $38^{\circ}06'45.79''N$   $4^{\circ}45'28.06''W$ ; Figura 2), tiene un área de 5,17 ha y está integrada por 4 parcelas de 4 propietarios distintos. Además, presenta una cárcava de 232 metros de longitud y 1,5 metros de profundidad media a lo largo de su recorrido.



**Fig. 1.** Localización de la Cuenca piloto del Arroyo Peñolite, encuadrado entre el Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y las Villas (zona rayada en amarillo) y el Lugar de Interés Comunitario E6160014 "Tramo Inferior del Guadalimar y Alto Guadalquivir.



**Fig. 2.** Mapa de la cuenca del Arroyo de Obejo en la Sierra de Córdoba. En la esquina superior derecha, la subcuenca piloto en la que se han realizado las acciones en campo. Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.- Metodología

#### 2.2.1- Obtención de Modelo Digital de Elevaciones a partir de imágenes LiDAR.

A partir de imágenes LiDAR (Light Detection and Ranging) obtenidas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional de



España (IGN), se ha obtenido un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con un paso de malla de 2 metros, a partir del modelo MDT02, no disponible aún para todo el territorio nacional, pero si disponible para la zona de estudio.

Las imágenes correspondientes a la zona de las cuencas piloto en formato LAZ (.laz) han sido procesadas en el software QGIS y el complemento para el procesamiento de nubes de puntos *LASTools*. El procedimiento es el siguiente:

1. Ejecución de la herramienta *lassplit* para dividir en conjunto de puntos más reducidos.
2. Ejecución de la herramienta *lasgroundPro* con la que se extraen los puntos asignados a la categoría “suelo”.
3. Ejecución de la herramienta *blast2demPro* para procesamiento de puntos y obtención de varias capas ráster MDE. Se unen esas capas ráster mediante la herramienta *combinar*.
4. Los productos LiDAR descargados suelen tener pequeñas zonas sin datos, se emplea la herramienta de *GDAL*; rellenar sin datos.

## 2.2.2- Delimitación de cuencas

A partir Modelo Digital de Elevaciones generado, mediante diferentes herramientas originales de SAGA (<https://live.osgeo.org/es/index.html>) y GRASS ([https://live.osgeo.org/es/quickstart/grass\\_quickstart.html](https://live.osgeo.org/es/quickstart/grass_quickstart.html)) implementadas en el software QGIS, se realiza el siguiente proceso:

1. Ejecución de la herramienta *Fill sinks* (SAGA) para corregir MDE de sumideros o depresiones, necesario para posteriormente obtener la red de canales.
2. Ejecución de la herramienta *r.watershed* (GRASS) con un área mínima de umbral de 120 m<sup>2</sup> para generación de subcuencas. Se obtienen en archivos ráster las celdas de acumulación de flujo y direcciones de drenaje.
3. Ejecución de la herramienta *r.water.outlet* (GRASS) donde se introduce el punto de drenaje, elegido como la desembocadura de los arroyos de Peñolite y Obejo.

## 2.2.3- Descripción y caracterización de las cárcavas

Las cárcavas efímeras se definen como pequeños canales que, si no fuesen reparados o labrados, se convertirían en rasgos permanentes de la red de desagüe (Smith, 1993). Poesen et al. (2002) consideran que la transición de reguero a cárcava efímera y finalmente cárcava es un proceso continuo. En el presente trabajo, tanto la modelización hidrológica de las cuencas como las visitas a campo han sido tenidos en cuenta para identificar las cárcavas efímeras de las cuencas del estudio, tras la identificación en ortofotografías y la

obtención del modelo digital de la red de canales usando QGIS (herramientas SAGA y GRASS) a partir del MDE proveniente de productos LiDAR.

### 2.2.3.1- Acumulación de flujo y pendientes

Previamente a las salidas de campo y a la selección de las áreas de intervención, se llevó a cabo un análisis de las acumulaciones de flujo y las pendientes de las cuencas hidrográficas de manera conjunta.

Finalmente, a partir de esta información y, contrastándola en las ortofotografías a escala 1:50.000 para cada zona mediante fotointerpretación, se ha elaborado primera aproximación de la red de cárcavas en las cuencas. Para ello, se han observado y seleccionado en las ortofotografías las zonas que presentaban mayores cambios de pendiente y valores de acumulación de flujo, las cuales son, a priori, vulnerables a sufrir erosión y generación de cárcavas.

### 2.2.3.2- Elección de umbral de iniciación y cálculo de la red de canales.

Mediante fotointerpretación y comparación in situ en visitas a campo se ha establecido un umbral de iniciación o área de concentración de flujo inicial de canal de las cuencas para la obtención de una red de cárcavas actuales. Variando el umbral de iniciación, también se han obtenido la red de cárcavas para escenarios futuros. Se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. A partir del MDE corregido sin sumideros, en el software QGIS se emplea la herramienta *Catchment area* (SAGA) mediante el método *Deterministic 8* para la obtención de la zona de acumulación en formato ráster.
2. Se emplea la herramienta *Channel Network* (SAGA) donde se introduce el umbral de iniciación para el área de las subcuencas que formarán cárcavas. Tras el proceso se obtiene la red de cárcavas actuales de toda la cuenca.
3. Para la obtención de la red de cárcavas para escenario futuro se sigue el mismo procedimiento descrito, incrementando el umbral de iniciación a uno menor, esto hace que para la formación de una cárcava se necesite menos área de captación. Los incrementos son proporcionales a los valores actuales para simular escenarios futuros, pero no tienen base física, lo que se espera explorar en próximos trabajos.

### 2.2.3.3- Relación de cárcavas y parcelas catastrales

La geolocalización y visualización de la red de cárcavas adquiere mayor valor agronómico cuando se establece una conexión con las parcelas catastrales



afectadas. Al identificar qué cárcavas se encuentran dentro de una parcela, es posible establecer relaciones con otras cárcavas ubicadas aguas arriba y aguas abajo, ya sea dentro de la misma cárcava o en cárcavas relacionadas. Esta información permite comprender de manera más integral el sistema de drenaje de la zona y facilita la implementación de estrategias de manejo y control de la erosión a lo largo de todo el sistema hídrico. Mediante el geoproceso de intersección incluido en el software QGIS, se obtienen los segmentos de cárcavas situadas dentro de parcelas. Estos segmentos resultantes han sido denominados como "subcárcavas", ya que representan subdivisiones más específicas de las cárcavas principales.

#### 2.2.3.4- Visitas a campo, elección del umbral de iniciación y cálculo de la red de cárcavas

Una vez generado el mapa con la ubicación de las posibles cárcavas, se han llevado a cabo las visitas a las parcelas y las reuniones con los propietarios para, finalmente, elegir las zonas de actuación. Como se dijo anteriormente, se va a actuar en dos cárcavas pertenecientes a las dos subcuencas piloto (Figuras 1 y 2).

Gracias a las visitas a campo y a las mediciones realizadas en las cárcavas sobre el terreno, se ha establecido un umbral de iniciación o área de concentración de flujo inicial de canal de las cuencas para la determinación de la red de canales o cárcavas actuales y posibles escenarios futuros si no se actúa en estas zonas. Para ello se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Cálculo del área de la subcuenca o de captación de que conforma la cárcava principal de las subcuencas piloto. Para ello, se ha ubicado el punto de desagüe de las misma en campo y se ha utilizado posteriormente la herramienta *r.water.outlet* (GRASS) en el Software QGIS para contrastarlo.
2. Utilización del valor de área obtenido para el cálculo de la red de cárcavas de las subcuencas piloto. Para ello, se ha utilizado la herramienta *Catchment area* (SAGA) y, a partir del método Deterministic 8 y el modelo digital del terreno sin depresiones se obtiene el ráster de acumulación. A continuación, a partir de la herramienta *Channel Network* (SAGA), estableciendo como *Initiation threshold* el área de la subcuenca, se obtiene la red de cárcavas actuales (Figuras 3 y 4).
3. Finalmente, para el cálculo de la red de cárcavas en un escenario futuro, se ha seguido este mismo procedimiento disminuyendo el área umbral inicial, y, por consiguiente, obteniéndose mayor densidad de la red de desagüe que representan las cárcavas, ya que las subcuencas tienen un área menor de captación para iniciar dichas cárcavas.

#### 2.2.4- Diseño y ejecución de las medidas en campo

Actualmente, solo se han llevado a cabo las acciones en la subcuenca de Obejo. Se han diseñado y ejecutado las siguientes medidas:

- Cubiertas vegetales autogerminativas y generadoras de bioproductos combinadas con diques de elementos modulares prefabricados de autoejecución y bajo coste en la cárcava principal, tipo SOILPROTECT desarrollados en el proyecto INNOLIVAR (2023) con la colaboración de las empresas Agresta y Vialca.
- Plantaciones de setos (*Citrus sp*, *Atriplex halalimus*, *Retama sphaerocarpa* y *Pistacea lentiscos*) a lo largo del camino que discurre por la subcuenca piloto. En este sentido el camino se ha dividido en dos zonas para el diseño de las medidas. De esta manera, podrá comprobarse en un futuro la diferencia entre cada medida en cuanto a recuperación de suelo y reducción de la erosión mediante la toma de muestras.
- Picado y enterrado de restos de poda para la regeneración de suelos y secuestro de carbono.
- Toma de 10 muestras para ver el estado actual del terreno y la evolución a lo largo del estudio: 2 en la cárcava principal (en el talud y en el fondo), 4 entre calles de olivar y 4 en la base de los olivos, para evaluar la capacidad de regeneración de las cubiertas y el secuestro de Carbono.

### 3.- Resultados y discusión

#### 3.1.- Red de cárcavas actual, escenario futuro y relación con parcelas catastrales

La tecnología LiDAR ha demostrado ser una técnica de teledetección revolucionaria empleada desde hace varios años para la creación de modelos de elevación de alta resolución (Chase et al., 2012; Olaya, 2020). En las Figuras 3 y 4 se observa la red de cárcavas actuales obtenidas del MDE generado a partir de la tecnología LiDAR con una resolución de 2 metros, así como su posible ampliación si no se aplica ninguna medida para reducir la erosión. Se ha generado una red de cárcavas digitalizada con gran nivel de detalle de las dos cuencas piloto.

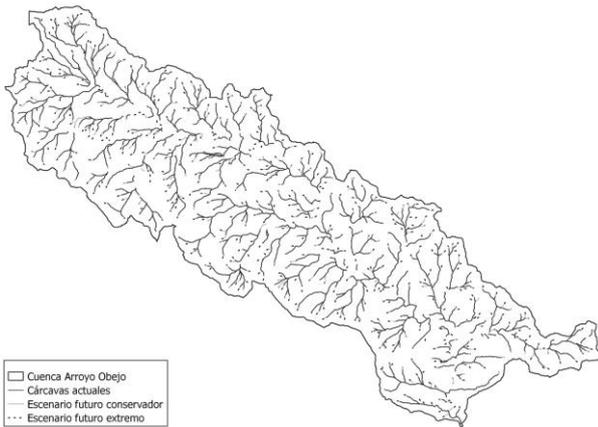


Fig. 3. Red de cárcavas actuales y escenario futuro de la cuenca del arroyo de Obejo.

Actualmente, hay un total de 3781,17 metros lineales de cárcavas en la cuenca del arroyo de Obejo y 568,70 metros lineales en la cuenca del arroyo de Peñolite.

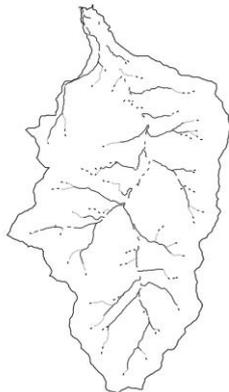


Fig. 4. Red de cárcavas actuales y escenario futuro de la cuenca del arroyo de Peñolite.

En la Figura 5 se observa la representación de cárcavas sobre parcelas catastrales. Para cada parcela se han agrupado las cárcavas que alberga por un identificador único. De la misma manera, se han asignado identificadores únicos a las subcárcavas dentro de cada parcela (Tabla 1).

Destaca la parcela 11 donde se identifican las subcárcavas 134\_3, 135\_1, 140\_2, 100\_3, 121\_2, 92\_3 (Tabla 1), de las que la 135\_1 no conecta a otras parcelas, pasa a la subcárcavas 134\_3 que sí conecta con la parcela 64, al igual que ocurre con la cárcava 100.

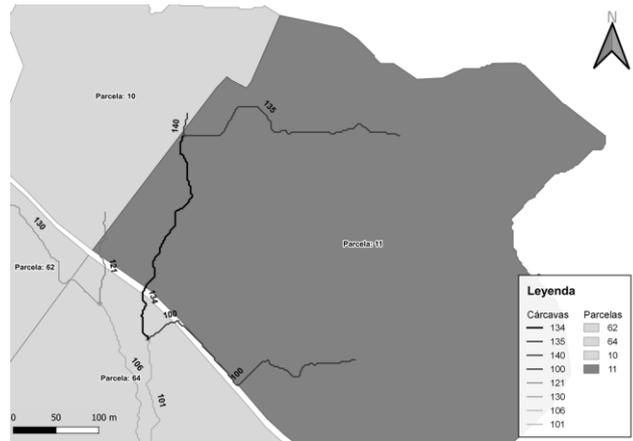


Fig. 5. Detalle de cárcavas representadas en parcelas catastrales

Tabla 1. Datos de parcelas representadas en Imagen 1. Consta de polígono, parcela, área de la parcela en m2, cárcavas presentes en la parcela por su identificador, subcárcavas presentes en la parcela por su identificador.

Polígono	Parcela	Área parcela (m <sup>2</sup> )	ID Cárcava	ID Subcárcavas
4	10	150.870,84	140, 178, 164, 121	178_5, 164_3, 140_1, 121_1
4	11	297,385.04	100, 134, 135, 140, 121, 92	134_3, 135_1, 140_2, 100_3, 121_2, 92_3
3	62	257.372,32	130, 136, 137, 244, 123, 126	244_3, 136_2, 126_2, 130_1, 137_2, 123_1
3	64	366.202,16	96, 89, 130, 64, 100, 101, 134, 104, 106, 86, 121, 92	134_2, 130_2, 106_1, 100_2, 104_3, 101_1, 121_4, 86_2, 96_1, 89_1, 92_1, 64_5

De esta manera, pueden establecerse relaciones entre parcelas a través de las cárcavas, y más concretamente de subcárcavas presentes directamente sobre las parcelas o que desembocan en otras cercanas las cuales sí afectan a determinada parcela.

Con esta información se puede comprender mejor cómo afecta la erosión en el desarrollo de cárcavas y permite tomar medidas para mitigar los impactos negativos.

### 3.2.- Acciones en campo

En la Figura 6 se muestra la retención de sedimentos gracias a los diques establecidos en la cárcava de la subcuenca piloto del arroyo Obejo, efecto similar a los resultados del proyecto CPI INNOLIVAR (INNOLIVAR, 2023).

La conjunción de la conectividad en la superficie con el proceso de iniciación de la escorrentía condiciona el flujo superficial del agua (e.g. Appels et al. 2016), por



lo que la cubierta es un buen complemento al dique de contención. En este sentido, las cubiertas que ya estaban presentes en las parcelas de los propietarios y las que se han colocado en el estudio, así como los setos colocados en los bordes de los caminos aledaños a la cárcava principal, también han influido en la reducción de la erosión y la acumulación de sedimentos en la cárcava.

Esto supone que, a causa de los eventos de precipitación y la escorrentía generada, la cárcava se va rellenando en su totalidad y por lo tanto, la erosión de se reduce por la presencia de estos diques.



**Fig. 6.** Acumulación de sedimentos en uno de los diques dispuestos en la cárcava principal de la subcuenca piloto de Obejo.

## 4.- Conclusiones

La generación de la red de cárcavas y delimitación de las cuencas hidrográficas previamente a las visitas a campo ha supuesto un ahorro en costes y tiempo. En este sentido, el uso de herramientas digitales ha ayudado a la toma de decisiones en cuanto a las acciones en campo.

A partir de las visitas a campo se ha comprobado que la red de cárcavas previamente digitalizada gracias a la tecnología LiDAR se ha generado correctamente con el umbral de iniciación seleccionado. No obstante, sería interesante seguir identificando cabeceras de cárcavas en campo para afinar más este valor.

En cuanto a los diques, frente a protecciones de cárcavas con costosas estructuras pesadas que necesitan de grandes equipos para su instalación, se han dispuesto fácilmente, por lo que el propio agricultor puede instalar de forma sencilla, obteniéndose correcciones viables y garantizando el éxito.

Los diques establecidos en la cárcava de Obejo han acumulado sedimentos en todos sus tramos, consiguiendo uno de los principales objetivos del estudio. En este sentido,

la cooperación con todos los propietarios de las parcelas por los que pasaba dicha cárcava ha sido esencial para poder obtener estos resultados.

Uno de los grandes objetivos de este trabajo es trabajar a nivel de cuenca con un enfoque holístico a la hora del diseño de las acciones. En este sentido, se ha comprobado que es necesario actuar a lo largo de toda la cuenca hidrográfica para solventar un problema de erosión como puede ser una cárcava, ya que, el problema aguas abajo no se soluciona si aguas arriba, en la zona de producción de flujo concentrado no se actúa adecuadamente.

Los suelos de las fincas de estudio son ácidos, texturalmente franco arenosos, aunque no presentan problemas de caliza. Son suelos degradados con bajo contenido en materia orgánica (<2%) que solo mejora levemente bajo las copas de los árboles con valores de entre 2,5 y 3,2 % gracias a la protección que le proporciona la planta y a los beneficios que aportan los restos de poda y recolección. En próximos muestreos se valorará el impacto de las medidas implementadas.

Ha sido esencial trabajar de manera colaborativa con agricultores y cooperativas para poder abordar los problemas y las soluciones de manera conjunta a nivel de cuenca.

Por último, sería interesante ampliar la escala de trabajo y estudiar el impacto ambiental, social y económico que supondría.

*Agradecimientos.* Este proyecto ha sido financiado por el Fondo Europeo de Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) y por la Junta de Andalucía a través de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (hoy Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural), dentro de la Operación 16.1.3: Ayudas al funcionamiento de los grupos operativos de la AEI en el sector del olivar, de la submedida "Apoyo para la creación y el funcionamiento de grupos operativos de la AEI en materia de productividad y sostenibilidad agroalimentaria".

## 5.- Bibliografía

- Appels, W.M., Bogaart, P.W., y van der Zee, S.E.A.T.M., 2016. Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity. *J. Hydrol.* 534:493-504
- Calero, J., Aranda, V., Montejó-Ráez, A., y J.M. Martín-García, 2018. A new soil quality index based on morpho-pedological indicators as a sitespecific web service applied to olive groves in the Province of Jaen (South Spain). *Comput. Electron. Agric.*, 146, 66-76.
- Cerdà, A., Lavee, H., Romero-Díaz, A., Hooke, J., y L. Montanarella, 2010. Soil erosion and degradation in Mediterranean-type ecosystems. *Land. Degrad. Dev.*, 21, 71-74.
- Chase, A. F., Chase, D. Z., Fisher, C., Leisz, S., y J. Weishampel, 2012. Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12.916-12.921.
- Dwarakish, G. S., y B.P. Ganasri, 2015. Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience*, 1(1), 1115691. <https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1115691>
- Escobar Villanueva, J. R., Iglesias Martínez, L., y J.I. Pérez Montiel, 2019. DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and LiDAR-Derived Ground Control Points for Flood Estimations. *Sensors*, 19(14), 3205.
- Espejo-Pérez, A.J., Rodríguez-Lizana, A., Ordóñez, R., y J.V. Giráldez, 2013. Soil loss and runoff reduction in olive-tree dry-farming with



- cover crops. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 77(6), 2140-2148.
- García, M.D., 2006. Reestructuración, explotaciones unifamiliares y el cultivo del olivar en Andalucía. *Economía, Sociedad y Territorio* VI,21, 119-150
- Gómez, J.A., Llewellyn, C., Basch, G., Sutton, P.B., Dyson, J.S., y C.A. Jones, 2011. The effects of cover crops and conventional tillage on soil and runoff loss in vineyards and olive groves in several Mediterranean countries. *Soil Use Manage.*, 27, 502-514.
- Guzmán-Álvarez, J.R., Gómez, J.A., y L. Rallo, 2009. Sostenibilidad de la producción de olivar en Andalucía. *Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía*.
- INNOLIVAR, 2023. En web (23.02.23): <https://innolivar.es/>
- Lima, F., Blanco, R., Gómez, M.L. y F.B. Galacho, 2019. Utilidad de los vehículos aéreos no tripulados para el estudio y mejora de la gestión agrícola en cultivos de olivar en zonas vulnerables a la degradación. En Romojaro, R. (coord.) *Las humanidades en el mundo digital/el mundo digital en las humanidades* (pp. 37-58). Ed. Tirant Humanidades, Valencia. ISBN: 978-84-17706-37-1.
- Mazzoleni, M., Paron, P., Reali, A., Juizo, D., Manane, J., y L. Brandimarte, 2020. Testing UAV-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment. *Natural Hazards*, 103(1), 139-163.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2022). En web (22.02.23): <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/aceite-oliva-y-aceituna-mesa/aceite.aspx>
- Olaya, V., 2020. *Sistemas de Información Geográfica*. <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- Poesen, J., Natchergaele, J., Verstraeten, G. y C. Valentin, 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50, 91-133.
- Poesen, J., L. Vandekerckhove, J. Nachtergaele, D. Oostwoud Wijdenes, G. Verstraeten, y B. Van Wesemael, 2002. Gully erosion in dryland environments. In: *Bull, L. J., and M. J. Kirkby (eds). Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Wiley, Chichester, UK. pp: 229-262.
- Smith, L. M., 1993. Investigation of ephemeral gullies in loessial soils in Mississippi. US Army Corps of Engineers. *Technical Report GL-93-11*. pp: 1-5.
- Singh, V. P., 1995. Modelos de computadora en la hidrología de cuencas. *Water Resources Publications, CO*.
- Valentín, C., Poesen, J., y Y. Li, 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63, 132-153.
- Vanwalleghem, T. y J.V. Giráldez, 2008. Midiendo fuera de las parcelas de erosión: importancia de erosión por cárcavas y regueros en cuencas de olivar. (pp. 211-217). *Jaén, Spain: VII Simposio del Agua en Andalucía*.
- Vieux, B. E., 2004. Modelación hidrológica distribuida utilizando GIS. *Water Science and Technology Library. Volume 48*.