



DIGITAL AGRI

MASTER EN TRANSFORMACIÓN DIGITAL
DEL SECTOR AGROALIMENTARIO Y FORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE REDES DE CÁRCAVAS
TOPOLÓGICAMENTE CONECTADAS EMPLEANDO
TECNOLOGÍA LIDAR Y SIG

Alumno/a: Antonio Miguel Gámiz Fuentes

Directores:

Adolfo Peña Acevedo

Fecha: Córdoba, 17 de septiembre de 2024

Anexo III

**AUTORIZACIÓN PARA LA DEFENSA DEL TRABAJO FIN DE
 MÁSTER***

Alumno/a	ANTONIO MIGUEL GÁMIZ FUENTES
D.N.I.	76589129A

Máster	PCEO MU Ingeniería Agronómica + Transformación digital del Sector Agroalimentario y Forestal
---------------	--

Curso Académico	2024/2025
------------------------	-----------

Título del Trabajo
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE REDES DE CÁRCAVAS TOPOLÓGICAMENTE CONECTADAS EMPLEANDO TECNOLOGÍA LIDAR Y SIG

Convocatoria	
Mes de defensa: Septiembre	Año:2024

Los Directores del Trabajo INFORMA FAVORABLEMENTE la defensa del mismo

El/La directora/a

PEÑA ACEVEDO
ADOLFO -
30531374R

Firmado digitalmente
por PEÑA ACEVEDO
ADOLFO - 30531374R
Fecha: 2024.09.17
14:39:48 +02'00'

Fdo.

Fdo. _____

El/La CoDirector/a

Fdo. _____

*Este formulario, debidamente cumplimentado y firmado (con firma digital o en su defecto, con firma manuscrita y escaneo del documento), deberá ser entregado por el/la alumno/a en formato pdf en el mismo soporte digital, junto con el resto de archivos integrantes del trabajo.

Autorización para la defensa del Trabajo Fin de Máster

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUCCIÓN	13
2 . OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 . OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1 SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	17
3.1.1 Proceso de elección para la zona de estudio.	20
3.1.1.1 Cuenca hidrográfica 1. Arroyo Obejo.....	20
3.1.1.2 Cuenca hidrográfica 2. Arroyo Peñolite.....	24
3.2 OBTENCIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES A PARTIR DE IMÁGENES	
LIDAR.	26
3.3 DELIMITACIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA.....	30
3.4 DESCRIPCIÓN Y GENERACIÓN DE CÁRCAVAS.....	32
3.4.1 Acumulación de flujo y pendientes.	33
3.4.1.1 Acumulación y dirección de flujo.	33
3.4.1.2 Cálculo de pendientes	33
3.4.2 Elección de umbral de iniciación y cálculo de la red de cárcavas.....	36
3.4.2.1 Filtrado de cursos de agua.....	39
3.5 RELACIÓN DE CÁRCAVAS CON PARCELAS. SUBCÁRCAVAS.....	40
3.5.1 Adaptación de recintos y parcelas.	40
3.5.2 Cálculo de pendiente media por parcela.	42
3.5.3 Generación de subcárcavas y conectividad.....	44
3.5.3.1 Generación de subcárcavas.....	45
3.5.3.2 Nodos de cárcavas.	45
3.5.4 Datos asociados a subcárcavas.....	48
3.6 VUELO RGB CON UAV.....	53

3.6.1 Planificación de vuelo UAV- RGB	54
3.6.2 Trabajo de campo	55
3.6.3 Procesado fotogramétrico del vuelo UAV-RGB	56
3.7 VUELO UAV-LIDAR	57
3.7.1 Planificación vuelo UAV-LiDAR.	58
3.7.2 Procesado fotogramétrico vuelo UAV-LiDAR.....	58
3.8 MONITORIZACIÓN DE LA RETENCIÓN DE SEDIMENTOS.	60
3.9 DIAGRAMA RESUMEN DE METODOLOGÍA.....	62
4 RESULTADOS Y DISCUSIONES	63
4.1 SELECCIÓN DE PARCELAS PILOTO.	63
4.1.1 Selección de parcela piloto en la cuenca de Obejo.....	63
4.1.2 Selección de parcela piloto en la cuenca de Peñolite.....	65
4.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.	68
4.2.1 Modelo Digital de Elevaciones Cuenca de Obejo.....	68
4.2.2 Modelo Digital de Elevaciones. Cuenca de Peñolite.....	71
4.3 PENDIENTES.....	74
4.4 CÁRCAVAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.	77
4.4.1 Cárcavas en la cuenca del arroyo Obejo.	77
4.4.2 Cárcavas en la cuenca del arroyo Peñolite	78
4.5 CONECTIVIDAD ENTRE CÁRCAVAS.	79
4.5.1 Cuenca del arroyo Obejo.....	80
4.5.2 Cuenca del arroyo Peñolite.....	81
4.6 DATOS ASOCIADOS A LAS CÁRCAVAS.....	82
4.7 RETENCIÓN DE SEDIMENTOS.	84
5 CONCLUSIONES	90
6 BIBLIOGRAFÍA	91
7 ANEXOS	95
7.1 ANEXO 1: METADATOS LIDAR, CUENCA OBEJO.	95
7.2 ANEXO 2: METADATOS DE LIDAR, CUENCA PEÑOLITE.....	97
7.3 ANEXO 3: CÓDIGO EN R PARA EL ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	100

Índice de Figuras

Figura 1. Superficie total en hectáreas de olivar comparado según destino productivo, España 2022. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2023).	13
Figura 2. Regueros generados por erosión en olivar de alta pendiente. Compose la cabecera o punto inicial de una cárcava.....	15
Figura 3. Detalle de la localización de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñolite ...	17
Figura 4. Detalle de la localización de la cuenca hidrográfica del arroyo Obejo.	18
Figura 5. Subcuenca piloto del arroyo Peñolite, detalle de parcelas afectadas y cárcava	19
Figura 6. Subcuenca piloto del arroyo Obejo, detalle de parcelas afectadas y cárcava.	19
Figura 7. Delimitación (línea roja) de posible cárcava. Parcela delimitada por línea verde.....	23
Figura 8. Herramienta Merge para unir las nubes de puntos.....	26
Figura 9. Unión de nubes de puntos.	27
Figura 10. Herramienta de filtrado con parámetros en imagen tras el filtrado.....	29
Figura 11. Resultado MDE a partir de la nube de puntos rasterizada.	30
Figura 12. Comparativa MDE (superior) y MDE corregido (inferior).....	31
Figura 13. Cuenca vectorizada.	32
Figura 14. Recorte MDE de la cuenca.....	34
Figura 15. Histograma de pendientes antes de aplicar la corrección.	35
Figura 16. Corrección de pendientes mediante calculadora ráster. Filtro condicional donde los valores superiores a 100 se quedan con valor 100 y el resto mantienen sus valores.....	35
Figura 17. Representación del método Deterministic 8. La flecha azul indica la dirección de flujo desde la celda central.	36
Figura 18. Área de captación obtenida.....	37

Figura 19. Red de cárcavas (líneas púrpuras) sobre MDE. Herramienta Channel Network con entradas proporcionadas.....	38
Figura 20. Cárcava de umbral 33.000 sobre ortofotografía de 2009.	39
Figura 21. Cárcavas actuales con umbral 10.000 (azul claro) y cárcavas ya existentes en 2009 (azul oscuro) sobre ortofotografía PNOA máxima actualidad.....	39
Figura 22. Filtrado de arroyos y ríos de la capa de cárcavas. Arroyo Obejo en púrpura como vectorial de tipo multipolígono y cárcavas extraídas por diferencia en color verde lima.....	40
Figura 23. Filtrado de parcelas contenidas en la cuenca del arroyo.	41
Figura 24. Extracción de pendientes de ráster para cada elemento vectorial, parcelas.	42
Figura 25. Creación índice 'ID_POLPA'.....	43
Figura 26. Exportar capa vectorial a PostgreSQL.....	44
Figura 27. Generación de subcárcavas por intersección de cárcavas con parcelas. Detalle que se han unido atributos de ambas capas vectoriales en elementos relacionados.	45
Figura 28. Generación de nodos (uniones de cárcavas).....	46
Figura 29. Consulta para generar identificaciones de subcárcavas.....	46
Figura 30. Consulta SQL para generar conectividad de cárcavas para precedentes y sucesivas/posteriores.	47
Figura 31. Consulta en SQL para unir conectividad con las subcárcavas actuales....	48
Figura 32. Creación de campo 'longitud_m'. Longitud en metros del tramo de subcárcavas.	48
Figura 33. Generación de pendiente lineal en porcentaje.....	49
Figura 34. Clasificación y obtención del ancho de cárcava según su 'order.	50
Figura 35. Obtención de la profundidad de la subcárcava según su 'order'.	50
Figura 36. Cálculo de número de albarradas	51
Figura 37. Cálculo de número de empalizadas.....	52

Figura 38. Consulta SQL para obtener la longitud total de una cárcava.....	53
Figura 39. Flujo de trabajo vuelos UAV-RGB.	54
Figura 40. Ejemplo de planificación vuelo UAV-RGB mediante DJI Ground Control Station Pro	55
Figura 41. Identificación manual y registro de GCP sobre imagen.	56
Figura 42. Flujo de trabajo vuelos UAV-LiDAR.	57
Figura 43. Figura de una pieza modular (Pareja Funes et al., 2021).	61
Figura 44. Diagrama resumen de metodología.....	62
Figura 45. Cuarta propuesta de visita a finca. En negro las cárcavas de la zona. La cárcava de interés es la limítrofe entre la parcela rosada (proporcionada por la cooperativa) y una de las parcelas azules (proporcionadas por AGAPA).....	64
Figura 46. Ampliación de la posible cárcava centrada en la imagen, delimitada por líneas negras.....	64
Figura 47. Mapa de parcelas seleccionadas. Detalle de cárcavas generadas automáticamente (azul).....	65
Figura 48. Cárcava situada aguas abajo, vistas hacia el camino y parcelas piloto.....	66
Figura 49. Mapa de parcelas seleccionadas. Detalle de cárcavas generadas automáticamente (naranja).	67
Figura 50. Histograma de elevaciones para MDE de Obejo.....	69
Figura 51. Gráfico de tipo "scatter plot" de la cuenca del arroyo Obejo. Comparación de MDE obtenido por datos LiDAR (eje de abscisas) frente a MDE de referencia (eje de ordenadas) obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica.....	69
Figura 52. MDE tridimensional de la cuenca del arroyo Obejo. Colores más ocres indican mayores elevaciones, a diferencia de colores más verdes que muestran menor elevación.	70
Figura 53. Histograma de elevaciones para MDE de Peñolite.....	71
Figura 54. Gráfico de tipo "scatter plot" de la cuenca del arroyo Peñolite. Comparación de MDE obtenido por datos LiDAR (eje de abscisas) frente a MDE de referencia (eje de ordenadas) obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica.....	72

Figura 55. MDE tridimensional de la cuenca del arroyo Obejo. Colores más ocres indican mayores elevaciones, a diferencia de colores más verdes que muestran menor elevación.	73
Figura 56. Comparación visual de mapas de pendientes en Obejo. i) Modelo Digital de Pendientes (PNOA); ii) Mapa de pendientes generado a partir de MDE LiDAR.	74
Figura 57. Comparación visual de mapas de pendientes en Peñolite. i) Modelo Digital de Pendientes (PNOA); ii) Mapa de pendientes generado a partir de MDE LiDAR.	75
Figura 58. Mapa de pendientes, cuenca de Peñolite.	76
Figura 59. Mapa de pendientes, cuenca de Obejo.	76
Figura 60. Red de cárcavas obtenidas en la cuenca del arroyo Obejo.	78
Figura 61. Red de cárcavas obtenidas en la cuenca del arroyo Peñolite.	79
Figura 62. Retención de suelo en albarrada 1.....	85
Figura 63. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 1.....	85
Figura 64 . Retención de suelo en albarrada 2.....	86
Figura 65. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 2.....	86
Figura 66. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 3.....	87
Figura 67. Retención de suelo en albarrada 3.....	87
Figura 68. Retención de suelo albarrada 4.....	88
Figura 69. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 4.....	88
Figura 70. . Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 5.....	89
Figura 71. Retención de suelo por albarrada 5.....	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Localización de posibles fincas experimentales para las zonas piloto.....	21
Tabla 2. Primera clasificación de pendientes en la cuenca del arroyo Peñolite.	25
Tabla 3 Clases definidas por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS).....	28
Tabla 4. Características técnicas de las piezas modulares para albarradas.	60
Tabla 5. Parcelas seleccionadas como fincas piloto. Cuenca del arroyo Obejo.	63
Tabla 6. Parcelas seleccionadas como fincas piloto. Cuenca del arroyo Peñolite.	67
Tabla 7. Muestra de datos de conectividad. Cuenca de Obejo.	80
Tabla 8. Muestra de datos de conectividad. Cuenca de Peñolite.	81
Tabla 9. Estadísticos descriptivos de los datos asociados a las cárcavas. Cuenca de Obejo.	82
Tabla 10. Estadísticos descriptivos de los datos asociados a las cárcavas. Cuenca de Peñolite	83

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo del Proyecto de investigación orientado a los retos de la sociedad “ CARCAVA. Influencia Climática y Agronómica en la formación y evolución de la Red de CARcaVas en la campiña Andaluza ” , financiado por la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía.

Generación automática de redes de cárcavas topológicamente conectadas empleando tecnología LiDAR y SIG.

Antonio Miguel Gámiz Fuentes

Adolfo Peña Acevedo

RESUMEN

Los graves problemas de erosión que afectan a grandes superficies de olivar en pendiente en Andalucía pueden llegar a generar pérdidas de suelo por encima de 40 kg/m² en eventos pluviométricos extremos. Por ello se requiere de una gestión integrada de las cuencas hidrográficas a cargo de los propietarios de las tierras y de los organismos estatales y regionales. La forma más frecuente y grave de erosión son las cárcavas. Estas cárcavas actúan como vías preferentes a través de las cuales las partículas sólidas con nutrientes y agroquímicos son transportadas ladera abajo por la escorrentía superficial, dando lugar a una gran pérdida de suelo y contaminación de cursos de agua.

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo automático para la evolución de redes de cárcavas basado en el algoritmo de dirección de flujo D8 y la obtención de conectividad entre ellas, así como la relación con las parcelas afectadas. El trabajo se desarrolló en dos cuencas experimentales con olivar en pendiente, correspondientes al arroyo Obejo (Obejo, Córdoba) y arroyo Peñolite (Puente de Génave, Jaén).

Se generaron dos Modelos Digitales de Elevaciones a partir de datos LiDAR para la obtención de las dos cuencas hidrográficas, la red de cárcavas y su conectividad de manera automática. A partir de los productos obtenidos, se realizaron vuelos UAV con sensores LiDAR para monitorizar la evolución de las cárcavas y los sedimentos retenidos en las zonas con diques modulares desarrollados en trabajos de innovación previos.

Palabras clave: Cárcavas; erosión; LiDAR; conectividad.

Automatic generation of topologically connected gully networks using LiDAR and GIS technology.

Antonio Miguel Gámiz Fuentes

Adolfo Peña Acevedo

ABSTRACT

The severe erosion problems affecting large areas of sloping olive groves in Andalusia can lead to soil losses of over 40 kg/m² during extreme rainfall events. This calls for integrated watershed management by landowners and state and regional authorities. The most common and severe form of erosion is gully erosion. These gullies act as preferential pathways through which solid particles containing nutrients and agrochemicals are transported downhill by surface runoff, resulting in extensive soil loss and contamination of watercourses.

The main objective of this work is the development of an automatic model for the evolution of gully networks based on the D8 flow direction algorithm and the determination of the connectivity between them as well as the relationship with the affected plots. The work was carried out in two experimental basins with sloping olive groves, corresponding to the Obejo stream (Obejo, Cordoba) and the Peñolite stream (Puente de Genave, Jaén).

Two Digital Elevation Models were generated from the LiDAR data. This allowed the two watersheds, their network of channels and their connectivity to be automatically obtained. From the products obtained, UAV flights with LiDAR sensors were carried out to monitor the evolution of the gullies and the sediments retained in the areas with modular dams developed in previous innovation projects.

Palabras clave: Gully; erosion; LiDAR; connectivity.

1 INTRODUCCIÓN

El olivar abarca en España 2,64 millones de hectáreas (MAPA, 2023) de las cuales 2,48 millones de hectáreas pertenecen a olivar de almazara (94% del total de olivar, Figura 1). 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 mundial con 1,56 millones de hectáreas y concentra, fundamentalmente en Jaén, su tan característico “mar de olivos” (MAPA, 2023). 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 (David & Brenes, 2006; Lima Cueto et al., 2019), lo que desemboca en perjuicios ambientales en esas áreas, 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) provocando la pérdida de suelo en los olivares (Cerdà et al., 2017; Gómez et al., 2011), superando los 400 Mg ha⁻¹ en eventos de precipitación extrema (Vanwallegem & Giráldez, 2008).

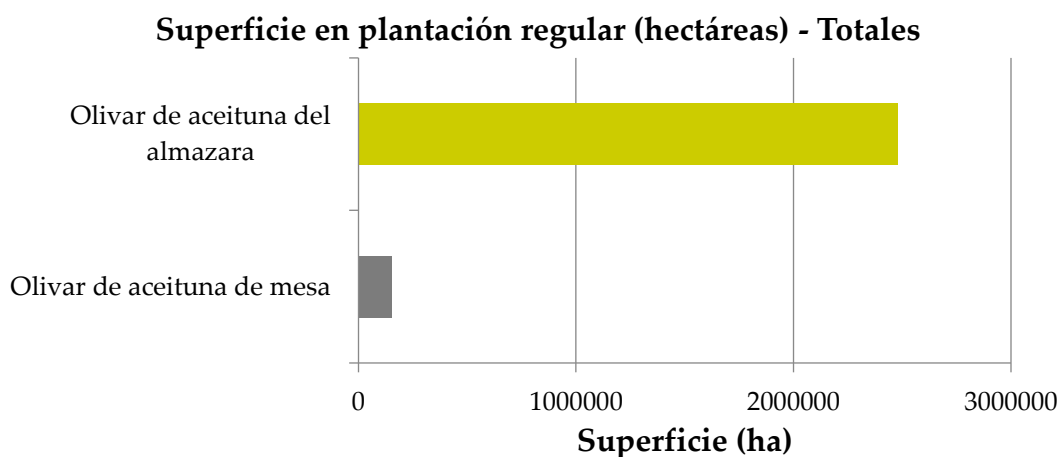


Figura 1. Superficie total en hectáreas de olivar comparado según destino productivo, España 2022. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2023).

El problema llega 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; Valentin 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 vivas, 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-escorrentía 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, 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, 1997), uno de los pioneros. No obstante, y, debido a que las computadoras eran costosas además de generar procesos muy lentos, la modelización se planteó de forma agregada (Vieux, 2016).

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 & Ganasri, 2015; Villanueva et al., 2019)



Figura 2. Regueros generados por erosión en olivar de alta pendiente. Compose la cabecera o punto inicial de una cárcava.

Pero, las sinergias que se producen entre distintas parcelas o explotaciones de una misma cuenca no son fáciles de percibir e interpretar desde una perspectiva individual ni mediante el examen visual de imágenes aéreas. Actualmente, es posible hacer uso de aplicaciones digitales que permita a un determinado agricultor, técnico o gestor visualizar e interpretar cómo están conectadas las acciones y cómo los efectos por la implantación de medidas para mejorar la gestión del suelo y el agua en una determinada parcela afecta a las demás. El enfoque es integral y holístico. Para ello hay disponible una gran cantidad de datos proveniente tanto de fuentes disponibles en abierto, como SIGPAC o la constelación de satélites Copernicus, como de las propias explotaciones o de vuelos con UAV (coloquialmente conocidos como drones) que permiten obtener datos precisos del terreno gracias a sensores LiDAR embarcados en los mismos.

Como consecuencia de estas consideraciones, se pretende aprovechar las TIC disponibles como vehículos de transferencia del conocimiento para implementar metodologías de iniciativas colectivas a escala de microcuenca, siendo este aspecto muy destacable en cuanto a que supone un nuevo enfoque o mejora de procesos clásicos de actuaciones en la agricultura, donde rara vez se consideran actuaciones conjuntas a niveles superiores de parcelas o propietarios.

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 (Eltner et al., 2016; Mazzoleni et al., 2020; Q. Wang et al., 2016), y son adecuadas para abordar el enfoque de análisis integral de la cuenca para la adopción de medidas colectivas que permitan corregir procesos y consecuencias que afectan a varias parcelas agrícolas y propietarios.

2 . OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.

Obtención de una red de cárcavas topológicamente conectadas mediante procedimientos automáticos.

2.2 . Objetivos específicos.

1. Generación de un modelo digital de elevaciones (MDE) a partir de tecnología LiDAR para la modelización hidrológica de cuencas y determinación de posibles cárcavas y zonas vulnerables de sufrir erosión.
2. Modelación de la red de cárcavas topológicamente conectadas en una cuenca hidrográfica.
3. Monitorización y seguimiento de las medidas a partir de sensores remotos.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Selección de la zona de estudio.

Los trabajos se han llevado a cabo en las cuencas piloto del arroyo Peñolite, en la provincia de Jaén ($38^{\circ}19'46.9''\text{N}$ $2^{\circ}47'30.2''\text{W}$; **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y del arroyo Obejo ($38^{\circ}05'54.6''\text{N}$ $4^{\circ}44'03.8''\text{W}$; Figura 4) de la provincia de Córdoba. 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 un enfoque holístico.

La subcuenca piloto del arroyo de Peñolite ($38^{\circ}20'27.23''\text{N}$ $2^{\circ}47'47.18''\text{W}$; Figura 5), tiene un área de 19,56 ha, está formada por 3 parcelas que pertenecen a 3 propietarios distintos y presenta una cárcava de 439 metros de longitud y 2 metros de profundidad media.

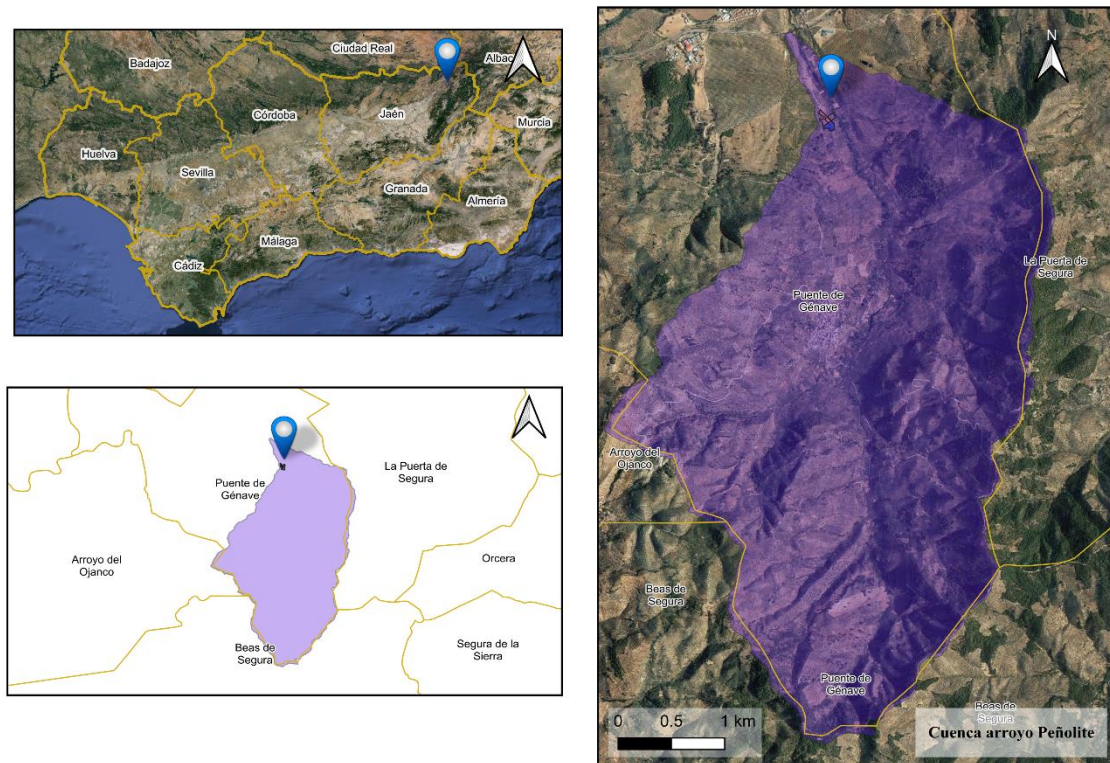


Figura 3. Detalle de la localización de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñolite

La subcuenca piloto del arroyo de Obejo, ($38^{\circ}06'45.79''\text{N}$ $4^{\circ}45'28.06''\text{W}$; Figura 6), tiene un área de 42,20 ha y está integrada por 5 parcelas de 5 propietarios distintos. Además, presenta una cárcava de 232 metros de longitud y 1,5 metros de profundidad media a lo largo de su recorrido.

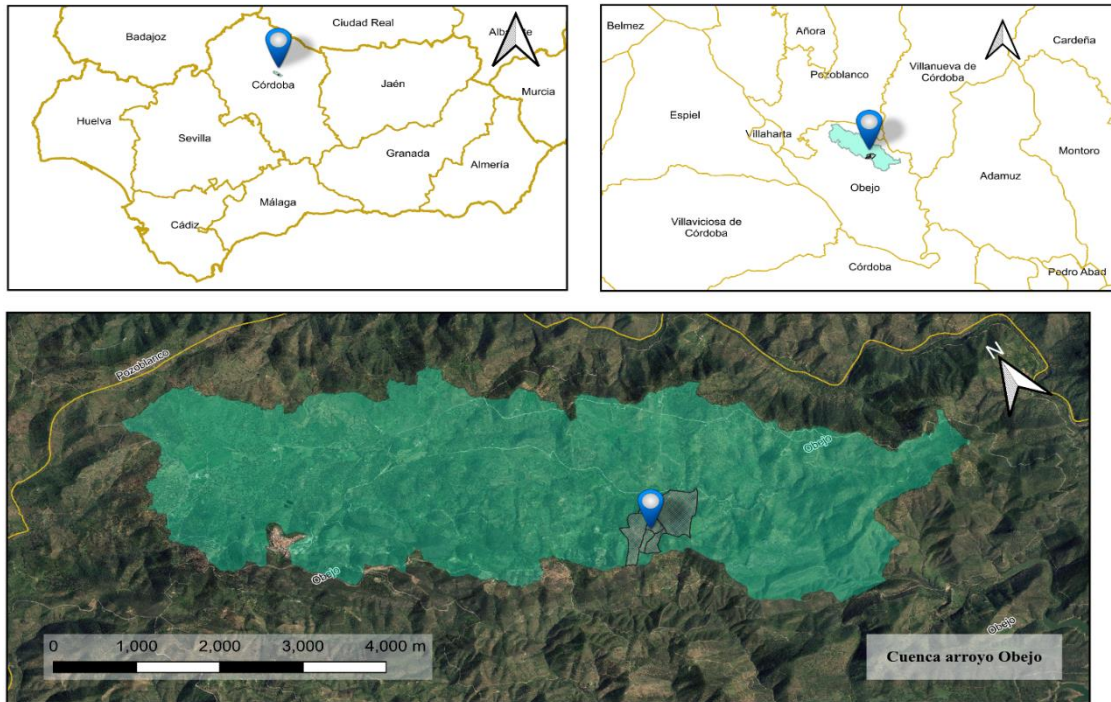


Figura 4. Detalle de la localización de la cuenca hidrográfica del arroyo Obejo.

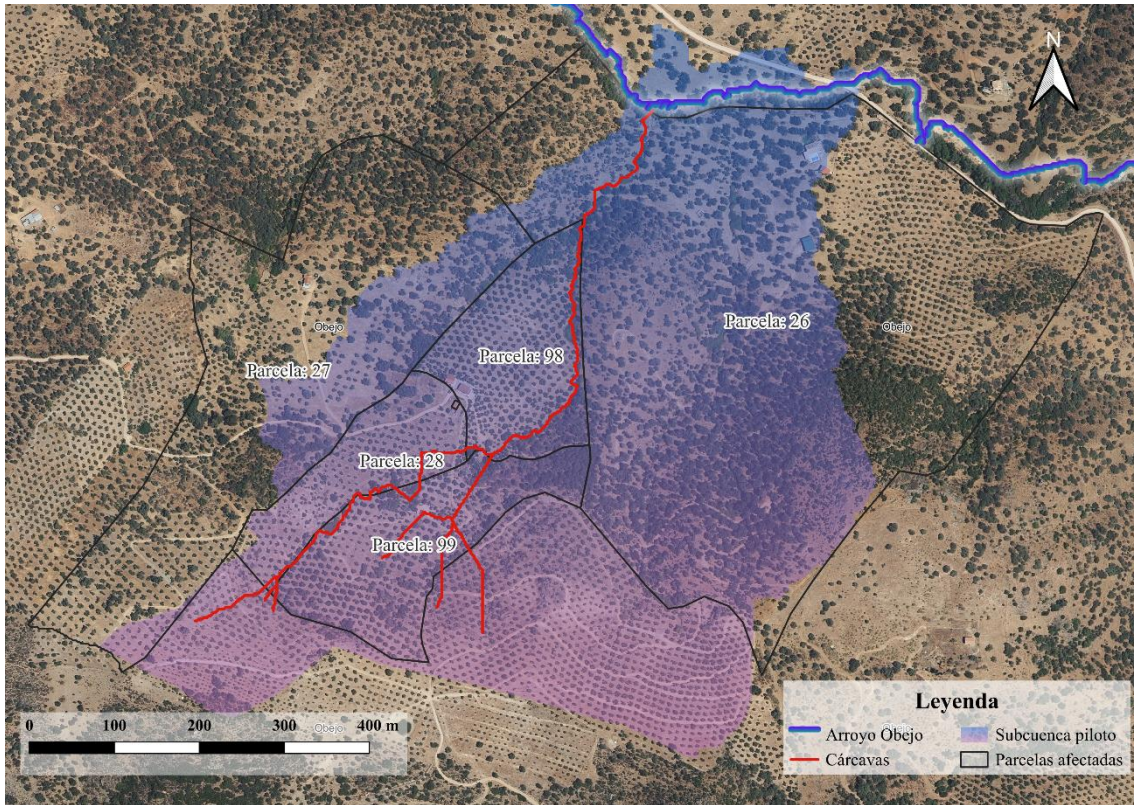


Figura 6. Subcuenca piloto del arroyo Obejo, detalle de parcelas afectadas y cárcava.

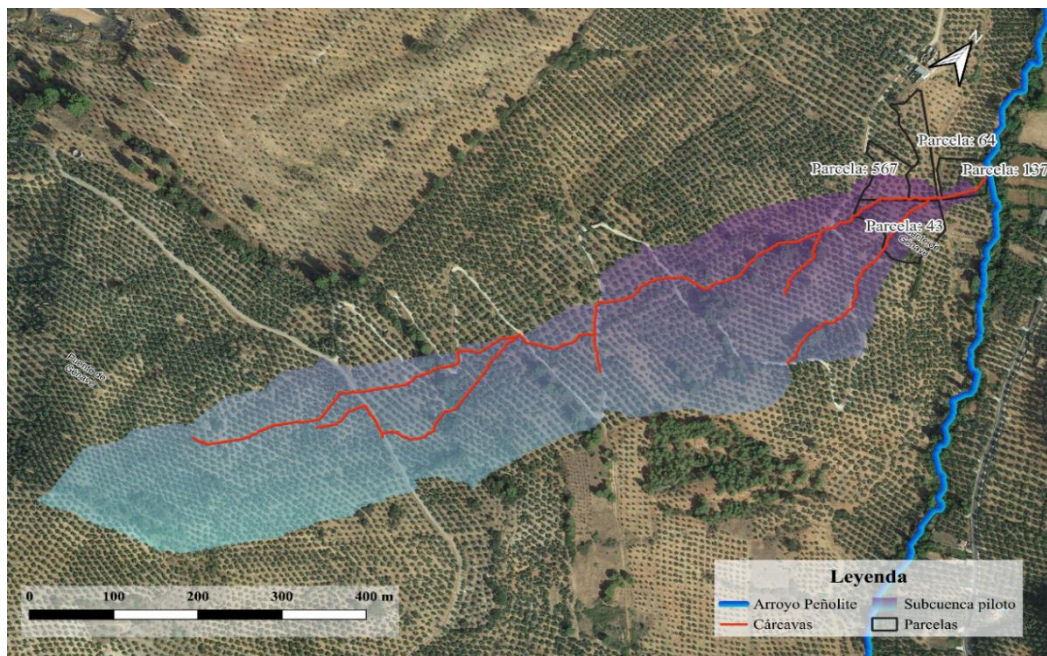


Figura 5. Subcuenca piloto del arroyo Peñolite, detalle de parcelas afectadas y cárcava

3.1.1 Proceso de elección para la zona de estudio.

3.1.1.1 Cuenca hidrográfica 1. Arroyo Obejo

En la primera visita a Obejo fechada el 13/07/2022, se mantuvieron reuniones con agricultores de la Cooperativa San Antonio Abad S.C.A. Varios agricultores se mostraron interesados y se ofrecieron a realizar visitas a sus fincas exponiendo los retos y dificultades a los que se enfrentan. Se realizó un estudio preliminar de modelización de cuenca siguiendo la metodología expuesta en el apartado 3.3, posteriormente se ejecutó un análisis cartográfico de la cuenca del arroyo Obejo.

Primero se realizó el análisis cartográfico de la cuenca del arroyo de Obejo. Con la información particular de las parcelas visitadas se extrajo información catastral y agrícola mediante la herramienta Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC, 2022). Se parte de dos paquetes adicionales de datos:

Datos de la PAC de 2021 aportados por AGAPA ([página web AGAPA](#)). Contiene datos de todas las parcelas presentes en la cuenca.

Datos proporcionados por ASAJA Córdoba y las cooperativas colaboradoras con el proyecto. Su desventaja es que no trabajan con todos los agricultores, pero las disponibles resultaron interesantes para establecer comunicación y tener mayor facilidad para el trabajo conjunto.

El proceso seguido para la selección de parcelas fue el siguiente:

1. Localización por coordenadas UTM (Tabla 1).

Tabla 1. Localización de posibles fincas experimentales para las zonas piloto.

LOCALIZACIÓN FASE EXPERIMENTAL				
CUENCA PILOTO	FINCA PILOTO	TÉRMINO MUNICIPAL	COORDENADAS UTM	
			X	Y
Arroyo Obejo (Córdoba)	Obejo 01	Obejo	342025	4223343
	Obejo 02	Obejo	343410	4223317
	Obejo 03	Obejo	349803	4218903
Arroyo Peñolite (Jaén)	Peñolite 01	Puente de Génave	518038	4242467
	Peñolite 02	Puente de Génave	518054	4243609
	Peñolite 03	Puente de Génave	517298	4243452

2. Consulta de información relacionada con cada parcela en SIGPAC. Se extrajo la información disponible para las parcelas a examinar sobre la que se obtuvo una idea preliminar de la situación de las diferentes fincas a través del visor SIGPAC de FEAGA ((SIGPAC, 2022)
3. Descarga de datos vectoriales tipo *shapefile* a través de la página de visor SIGPAC Andalucía (Junta de Andalucía, 2022). Identificación de parcelas con olivar por atributos, solo se eligieron aquellas parcelas propuestas con olivar, se pueden superponer capas vectoriales de parcelas con olivar y ortofoto de máxima actualidad de PNOA (Instituto Geográfico Nacional, 2023b).

Se importaron los datos en archivos *.csv* aportados por ASAJA Córdoba al software QGIS (QGIS.org, 2023). Posteriormente se incorporó el parcelario

vectorial del término municipal aportado por AGAPA (datos cedidos por AGAPA para uso en investigación; AGAPA, 2022).

Se elaboró una nueva columna en cada tabla de atributos mediante la concatenación de polígono, parcela y recinto. El objetivo es crear un identificador para facilitar la unión de datos. Mediante la herramienta “Uniones” se enlazaron las parcelas vectoriales con los datos en tablas a través del identificador anterior.

4. Generación de pendientes. Se compararon pendientes con zonas de acumulación de flujo obtenidas en el paso anterior. La obtención de pendientes viene explicada posteriormente, en el apartado 1.5.Cálculo de pendientes.

Se pueden delimitar áreas donde hay cambios de pendiente junto con áreas de acumulación de flujo. Así se da lugar a información preliminar sobre la posible situación de cárcavas en las fincas, facilitando su localización y evaluación.

A partir de la acumulación de flujo y las zonas de cambio de pendiente se acotaron las posibles zonas de cárcavas en las parcelas examinadas. Se crea una nueva capa vectorial de polígonos para delimitar de forma manual las zonas de posibles cárcavas a partir de los mapas generados. Posteriormente se validarán con ortofotografías de alta resolución obtenidas del PNOA.

5. Delimitación de cárcavas por polígonos en áreas de estudio.

Una vez localizado el olivar y georreferenciado con las parcelas vectoriales de SIGPAC, se procedió a observar las posibles cárcavas en dichas parcelas.

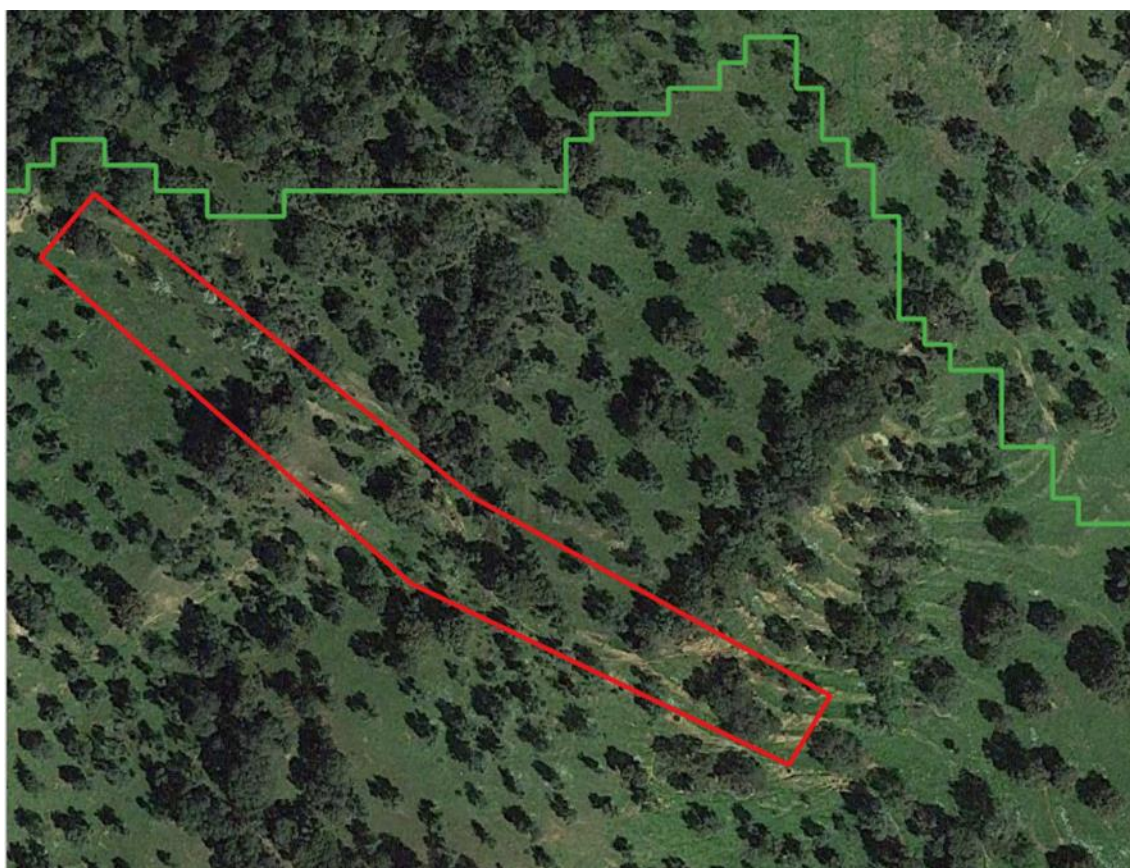


Figura 7. Delimitación (línea roja) de posible cárcava. Parcela delimitada por línea verde.

Criterios para la elección de parcelas experimentales.

Una vez realizado en profundidad todo el análisis de cárcavas con sus ubicaciones exactas y las parcelas a las que pertenecen, así como el filtrado previo de los olivares y la georreferenciación de sus parcelas vectoriales, se procedió a determinar los criterios para elegir las zonas de visitas y actuaciones en campo, que son las siguientes:

1. Cárcavas que pertenezcan a olivares proporcionados por ASAJA o Cooperativa
2. Cárcavas que estén en cuencas con más parcelas proporcionadas por ASAJA o Cooperativa, si es posible, para poder trabajar juntos y a nivel de cuenca.
3. Cárcavas que se vean con más facilidad en las imágenes satélite (ya que hay algunas que pueden ser claramente identificadas).
4. Búsqueda de zonas diferentes dentro de la cuenca (punto de desagüe, zona norte, etc.)

Finalmente, para cada una de estas cárcavas, se señalaron sus ubicaciones, la cuenca a la que pertenecen a partir de su acumulación de flujos, su identificación catastral, la pertenencia a parcelas proporcionadas por ASAJA o Cooperativa y las otras parcelas de la cuenca en la que se ubican también proporcionadas por ASAJA o Cooperativa.

3.1.1.2 Cuenca hidrográfica 2. Arroyo Peñolite

En la primera visita a Puente de Génave fechada el 12/07/2022, se mantuvieron contactos con agricultores de la zona, socios de la cooperativa Agrosegura Aceites SCA. Después de la reunión se visitaron varias parcelas de agricultores donde los propietarios expresaron los problemas a los que se enfrentan, que convergen todos en la difícil accesibilidad a fincas y la baja rentabilidad que les generan sus olivares. Aunque la problemática no infiere directamente en cárcavas o problemas de erosión si se prestaron a participar en las actuaciones que se diseñarán para sus explotaciones

Se realizó un estudio preliminar de modelización de cuenca siguiendo la metodología expuesta en el apartado Cuenca hidrográfica 1. Arroyo Obejo, posteriormente se ejecutó un análisis cartográfico de la cuenca del arroyo Peñolite, explicado a continuación.

A partir de la primera visita a fincas en la cuenca del arroyo Peñolite se tomaron localizaciones de referencia de cada parcela, así como la posición de cada una.

Con estos datos se extrajo la información catastral y agrícola mediante la herramienta Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC, 2022).

En el caso de Peñolite se parte del paquete de datos proporcionado por AGAPA (AGAPA, 2022). De los que se filtran las parcelas de olivar (uso 'OV'), dando como resultado a que la mayoría de las parcelas se dedican al cultivo del olivar.

El proceso es el siguiente:

1. Localización por coordenadas UTM de las zonas en una fase experimental previa. Las coordenadas de las zonas preliminares de la cuenca del arroyo Peñolite pueden consultarse en Tabla 1. Localización de posibles fincas experimentales para las zonas piloto.
2. Consulta de información relacionada con cada parcela en catastro (Dirección General del Catastro, 2023) y SIGPAC (SIGPAC, 2022).

Una vez se obtuvo la cuenca hidrográfica del arroyo Peñolite también se calculó el mapa de acumulación de flujo para toda la cuenca. Proceso descrito en .3.4.1.1

A partir de la información obtenida se calcularon las pendientes de la cuenca, proceso descrito en el apartado 1.5 Se clasificaron las pendientes de forma automática en 5 clases relativas a los valores máximos y mínimos, son:

Tabla 2. Primera clasificación de pendientes en la cuenca del arroyo Peñolite.

Clasificación de pendientes (%)	
Mínima	Máxima
0,02	14,3
14,3	28,59
28,59	42,87
42,87	57,16
57,16	(superiores)

A partir de los datos de acumulación de flujo y pendientes se delimitaron las posibles zonas de cárcavas mediante polígonos vectoriales tal como se describe en el apartado 3.1.1.1 Cuenca hidrográfica 1. Arroyo Obejo.

A continuación, se detallan algunas cárcavas seleccionadas visualmente sobre una ortoimagen de PNOA máxima actualidad. (Instituto Geográfico Nacional, 2023b)

Una vez localizadas posibles cárcavas se hace una revisión visual de su localización con ortofotografías en las parcelas piloto caracterizadas. Los criterios para la selección de parcelas para las actuaciones son iguales a los mostrados en el caso de Obejo anteriormente (Criterios para la elección de parcelas experimentales).

3.2 Obtención de Modelo Digital de Elevaciones a partir de imágenes LiDAR.

Se emplearon imágenes LiDAR (Light Detection and Ranging) obtenidas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN) (Instituto Geográfico Nacional, 2023b) con resolución espacial de 1,5 puntos/m² obtenidas en 2020 para el caso de Andalucía.

Tras el procesado de la nube de puntos, se obtuvo un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con un paso de malla de 2 metros, referentes los términos municipales en los que se encuentran ambos cauces; Puente de Génave y Obejo.

Las imágenes correspondientes a la zona de las cuencas piloto en formato LAZ (.laz), fueron procesadas en el software Cloud Compare® (CloudCompare 2.12.4, 2023). El procedimiento es el siguiente:

1. Importación de archivos .laz descargados anteriormente de PNOA y obtenidos de la descompresión.
2. Unión de todos los archivos en una sola nube de puntos mediante la herramienta *Merge*.

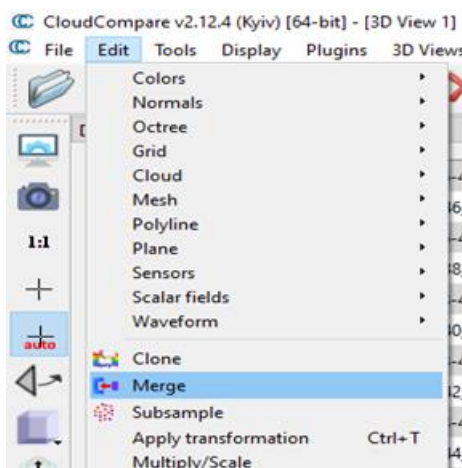


Figura 8. Herramienta Merge para unir las nubes de puntos.

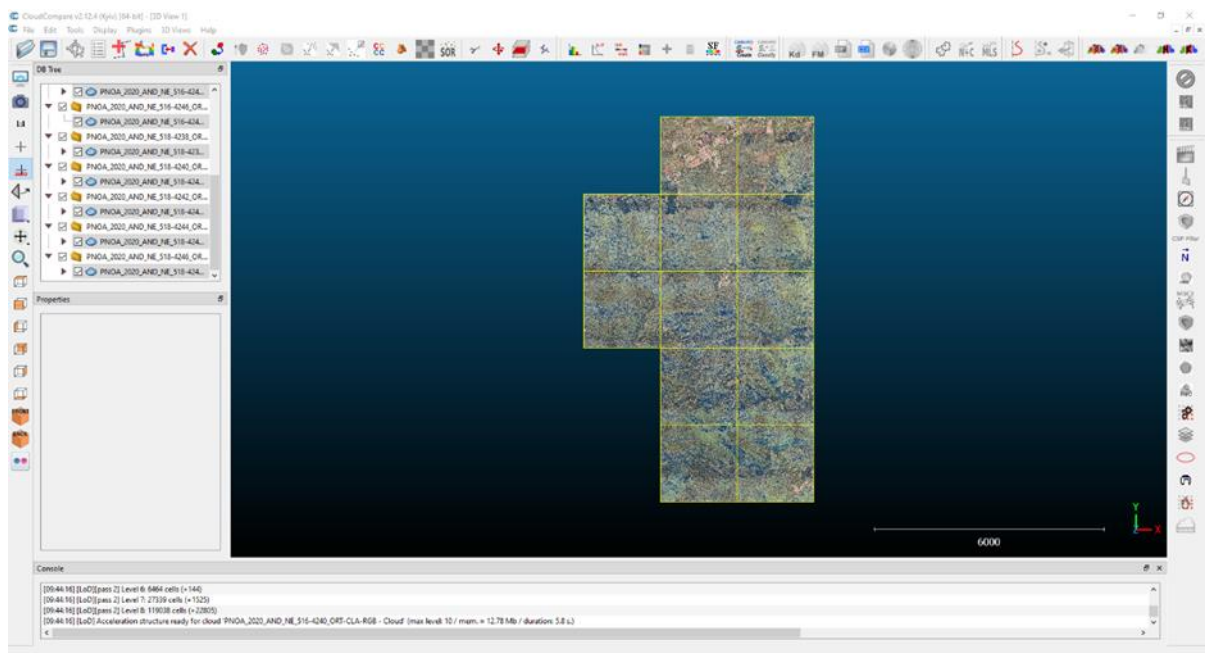


Figura 9. Unión de nubes de puntos.

3. Filtrado de puntos.

Los puntos proporcionados vienen clasificados según PNOA, la clasificación correspondiente a puntos de suelo es de tipo 2 (ver Tabla 3; American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2019) contenidos en los metadatos de los archivos descargados. Para filtrarlos en Cloud Compare se hizo uso de la herramienta *Filter by value* y se estableció un mínimo de 1.1 y máximo de 2.1 para asegurar el rango de valores pertenecientes a suelo. El número de puntos correspondientes a la clase 2, pueden encontrarse en los metadatos (ver anexos 7.1; 7.2)

Tabla 3 Clases definidas por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS).

Clase	Significado
0	Sin clasificar
1	No clasificado
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificación
7	Ruido
8	Clave de modelo
9	Agua
10	Reservado ASPRS
11	Reservado ASPRS
12	Solape
13-31	Reservado ASPRS

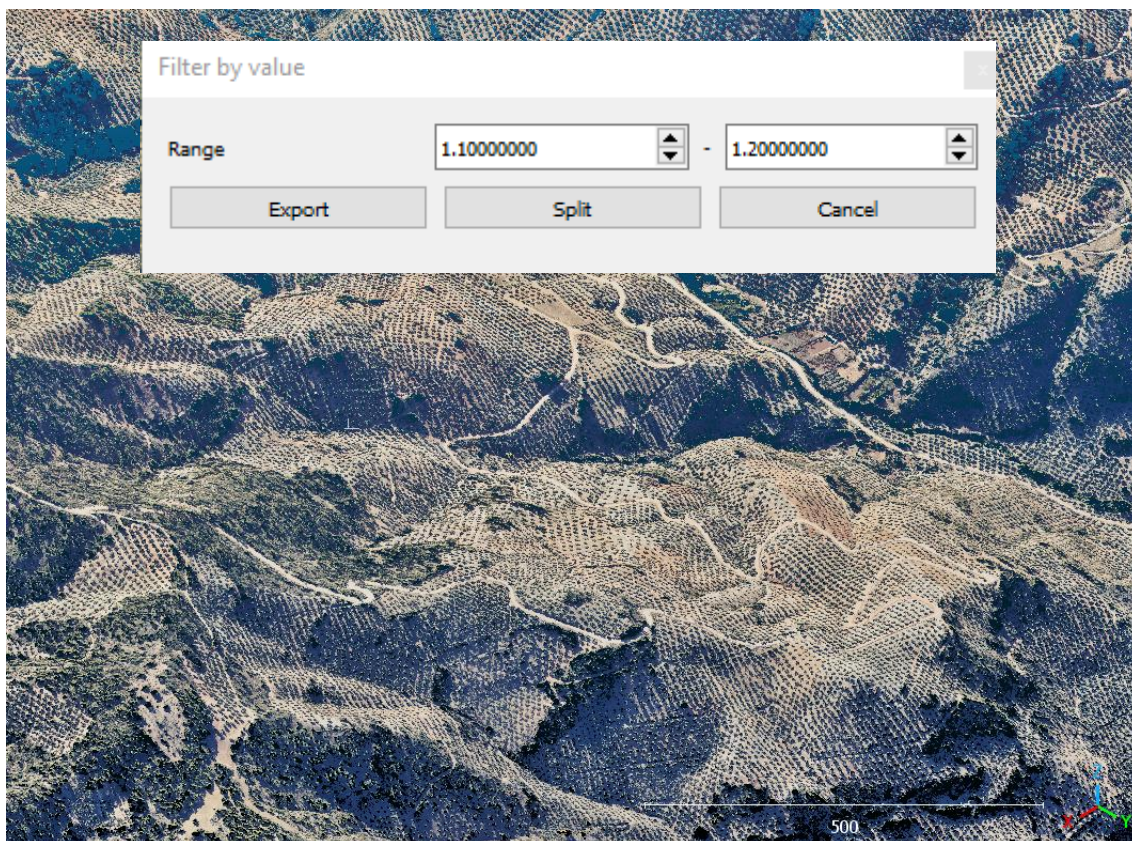


Figura 10. Herramienta de filtrado con parámetros en imagen tras el filtrado.

4. Rasterizar. Convertir la nube de puntos a un modelo digital de elevaciones (MDE).

Se generó un archivo ráster con información georreferenciada de las elevaciones, para este caso el promedio de las elevaciones para cada píxel cuyas dimensiones son de 2 x 2 metros definidas en el proyecto LiDAR de segunda cobertura realizado el año 2020 (Instituto Geográfico Nacional, 2023b).

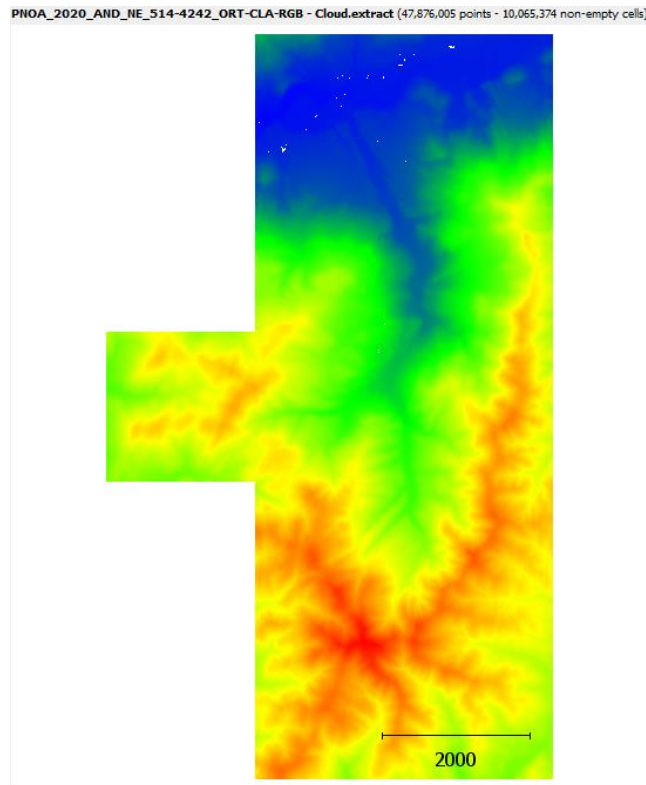


Figura 11. Resultado MDE a partir de la nube de puntos rasterizada.

3.3 Delimitación de cuenca hidrográfica.

A partir Modelo Digital de Elevaciones generado (ver Figura 11), mediante diferentes herramientas incluidas en el software QGIS (QGIS.org, 2023) se realizó el siguiente proceso adaptado de Kwast et al., 2020, para la obtención de una cuenca hidrográfica donde necesitaremos un MDE y un punto de desembocadura del arroyo.

1. Ejecución de la herramienta *Fill sinks* (L. Wang & Liu, 2006) para corregir MDE de sumideros o depresiones (paquete de herramientas incorporadas por SAGA (Conrad et al., 2015)).

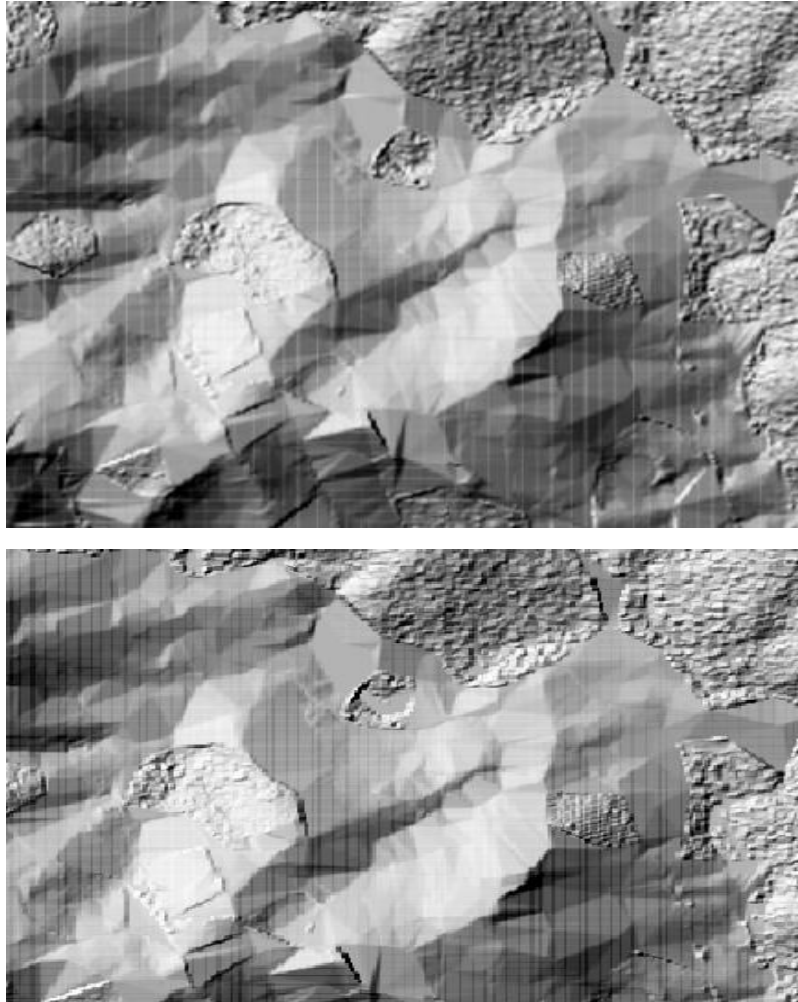


Figura 12. Comparativa MDE (superior) y MDE corregido (inferior).

2. Obtención de dirección de flujo y acumulación de flujo.

Ejecución de la herramienta *r.watershed* (herramienta proveniente del paquete de herramientas GRASS (GRASS Development Team, 2023)) con un área mínima de umbral de 120 m² para generación de subcuencas, este cálculo proviene. Se obtuvieron, entre otros, los archivos ráster de las celdas de dirección de flujo y la red de celdas que acumulan en otras celdas.

3. Obtención de la cuenca ráster.

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 que resulta ser del mayor valor de la capa ráster celdas que acumulan en otras celdas obtenida en el apartado anterior. Una vez elegido ese punto de drenaje se ejecuta la herramienta sobre el MDE corregido.

La capa obtenida (ráster) se vectorizó como polígono mediante la herramienta *r.to.vect* de GRASS.

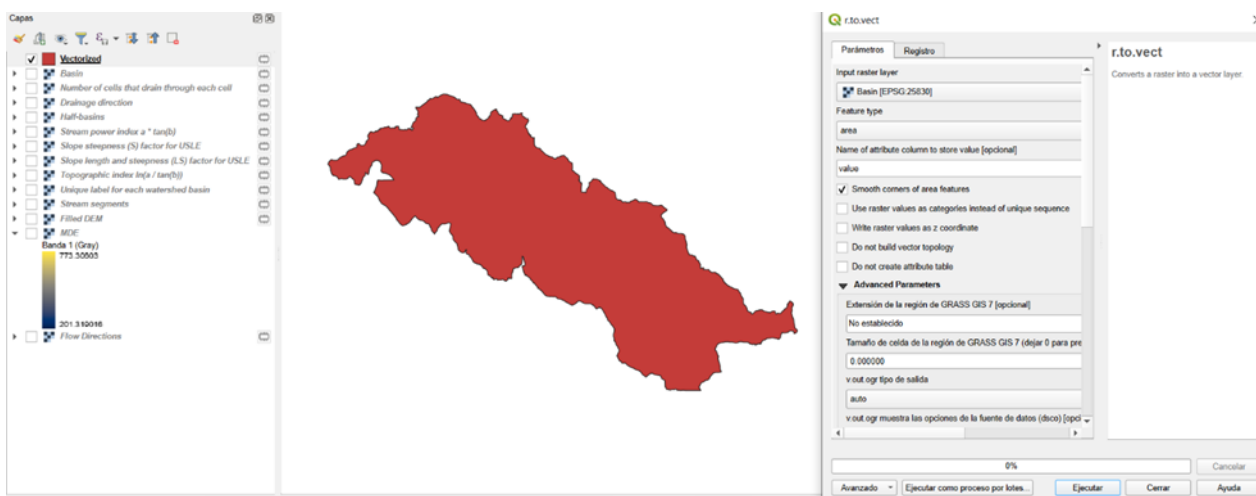


Figura 13. Cuenca vectorizada.

3.4 Descripción y generación de 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. Poesen et al., 2002 y Smith, 1993 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 a partir del MDE proveniente de productos LiDAR.

3.4.1 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 una 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.

3.4.1.1 Acumulación y dirección de flujo.

La acumulación de flujo se procesa eligiendo el píxel del borde del MDE con menor elevación, de todos los píxeles situados inmediatamente a su alrededor se elige el de menor elevación y así sucesivamente con cada píxel de alrededor (Beven & Kirkby, 1993). El proceso se menciona en la página 32, por medio de la herramienta *r.watershed* (GRASS Development Team, 2023).

3.4.1.2 Cálculo de pendientes

Para la obtención de pendientes en porcentaje se procesó en QGIS de la siguiente manera:

1. Se recorta el MDE ráster con la cuenca vectorial, para facilitar el procesado de datos y generar limpieza en los resultados. La herramienta empleada es de la pestaña *Ráster*, *Cortar ráster por capa de máscara*.

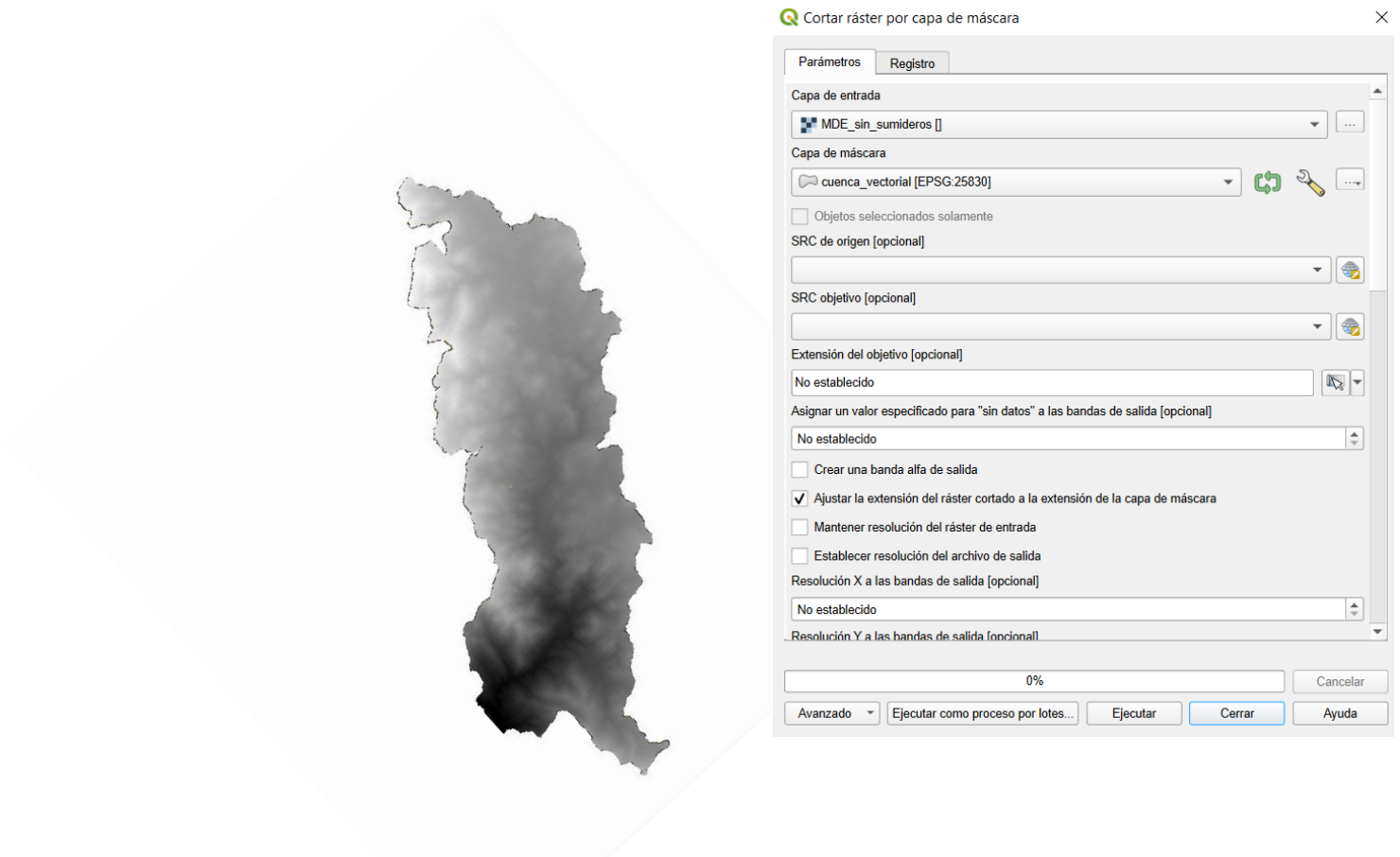


Figura 14. Recorte MDE de la cuenca.

2. La pendiente se obtiene por la herramienta ráster *Pendientes* del paquete GDAL. Es importante seleccionar Pendiente expresada en porcentaje en vez de grados.

En el ráster resultante aparecen unidades máximas por encima de 100, esto se debe a que la pendiente es tan pronunciada en ciertas zonas que al paso de un píxel a otro hay gran diferencia de altura. Aunque no sean muchos valores (Figura 15, se deben corregir.

Los valores de pendientes superiores a 100 se corrigen por medio de la calculadora ráster aplicando una máscara donde los valores superiores a 100 se quedan con valor 100 y el resto mantienen sus valores (Figura 16).

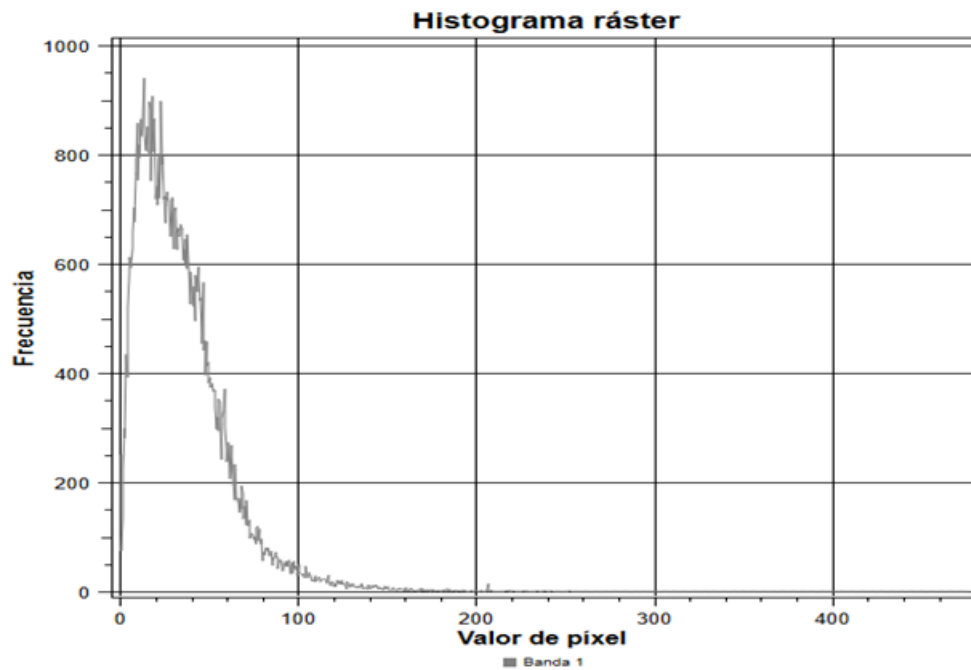


Figura 15. Histograma de pendientes antes de aplicar la corrección.

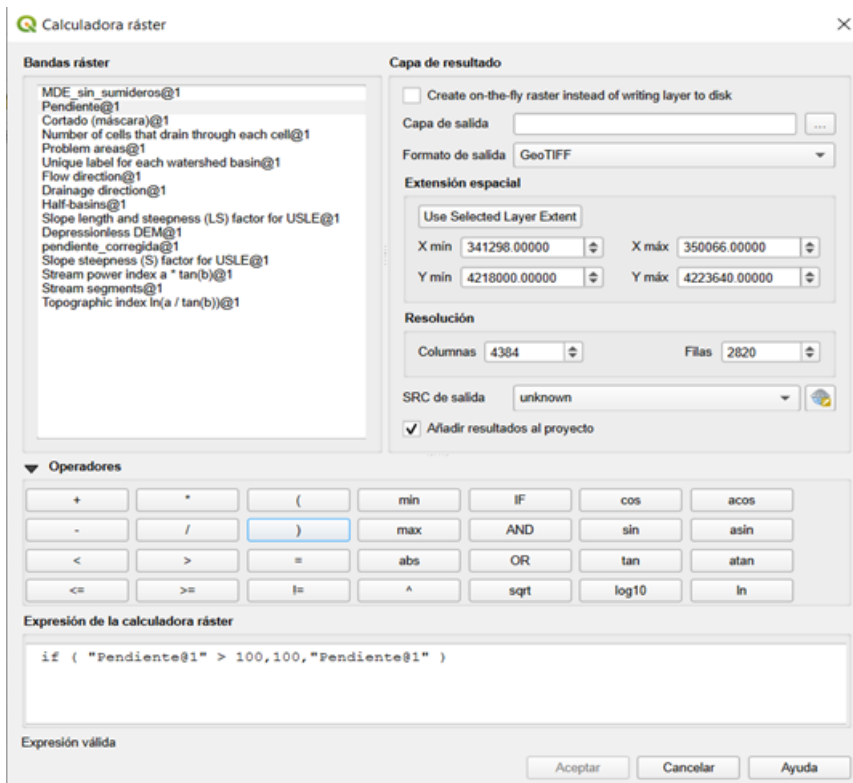


Figura 16. Corrección de pendientes mediante calculadora ráster. Filtro condicional donde los valores superiores a 100 se quedan con valor 100 y el resto mantienen sus valores.

3.4.2 Elección de umbral de iniciación y cálculo de la red de cárcavas.

El umbral de iniciación se emplea para establecer un nivel mínimo de acumulación de flujos a partir del cual, se genera de forma discreta una red de drenaje por la unión de celdas sobre las que discurre una ruta de flujo. En este trabajo el umbral de iniciación se ha obtenido a partir de un análisis por fotointerpretación de más de 3.000 cabeceras de cárcavas, a las que se les ha calculado el área de drenaje individualmente, obteniéndose así los rangos más comunes de estos valores para el umbral de iniciación en áreas de olivar con características morfológicas, climáticas y texturales similares a las zonas de estudio (Paula et al., bajo redacción).

El procedimiento es el siguiente:

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 (O'Callaghan & Mark, 1984). El método *Deterministic 8* evalúa cada celda en sus 8 direcciones posibles y establece la dirección de flujo hacia la celda de menor elevación entre las ocho celdas vecinas respecto a la celda central. El área de captación o acumulación de flujo permite conocer las rutas del flujo de agua que tendrán las posibles cárcavas y su localización.

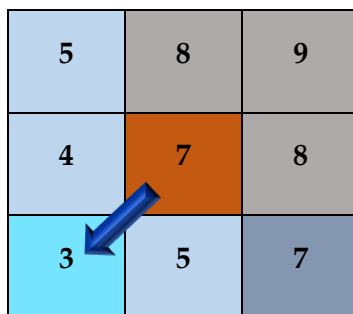


Figura 17. Representación del método *Deterministic 8*. La flecha azul indica la dirección de flujo desde la celda central.

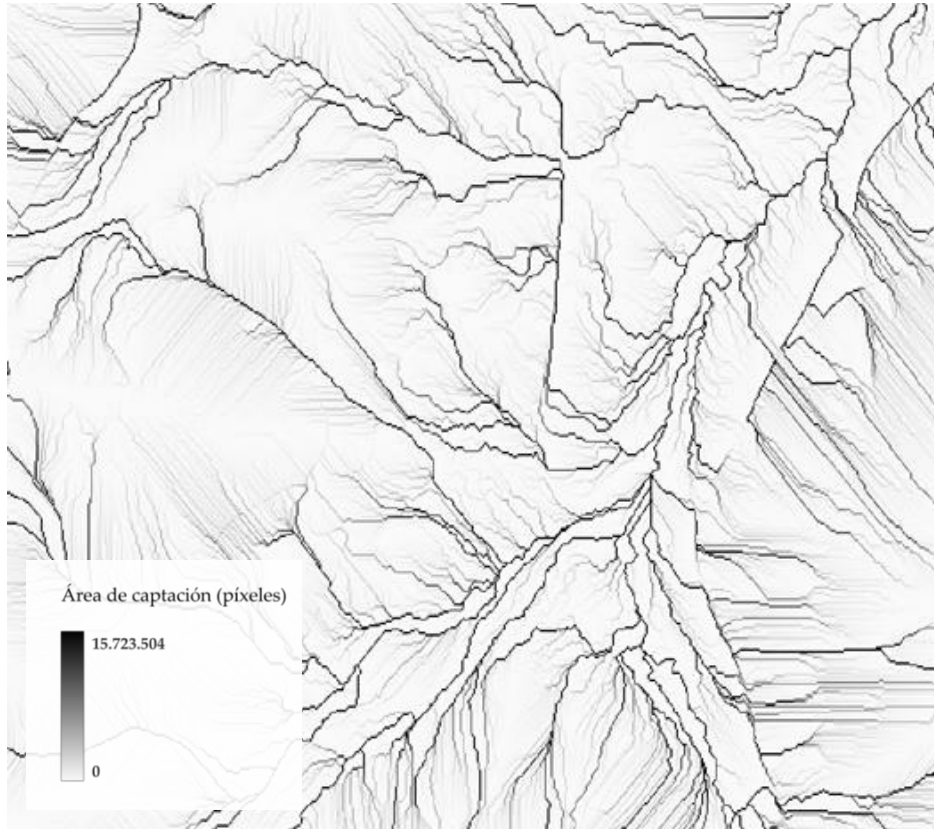


Figura 18. Área de captación obtenida.

2. Para la generación de cárcavas se emplea la herramienta *Channel Network* (SAGA). Se introduce el MDE corregido y como rejilla de iniciación se usa el área de captación. Tras el proceso se obtiene la red de cárcavas actuales de toda la cuenca. El umbral se valida y adapta por fotointerpretación con ortofotografías de máxima actualidad del PNOA, donde se acaba seleccionando el valor de umbral que mejor coincida con las cárcavas de la cuenca. El umbral que se elige para cárcavas actuales es de 10.000 en el caso de Obejo y de 12.000 en el caso de Peñolite.

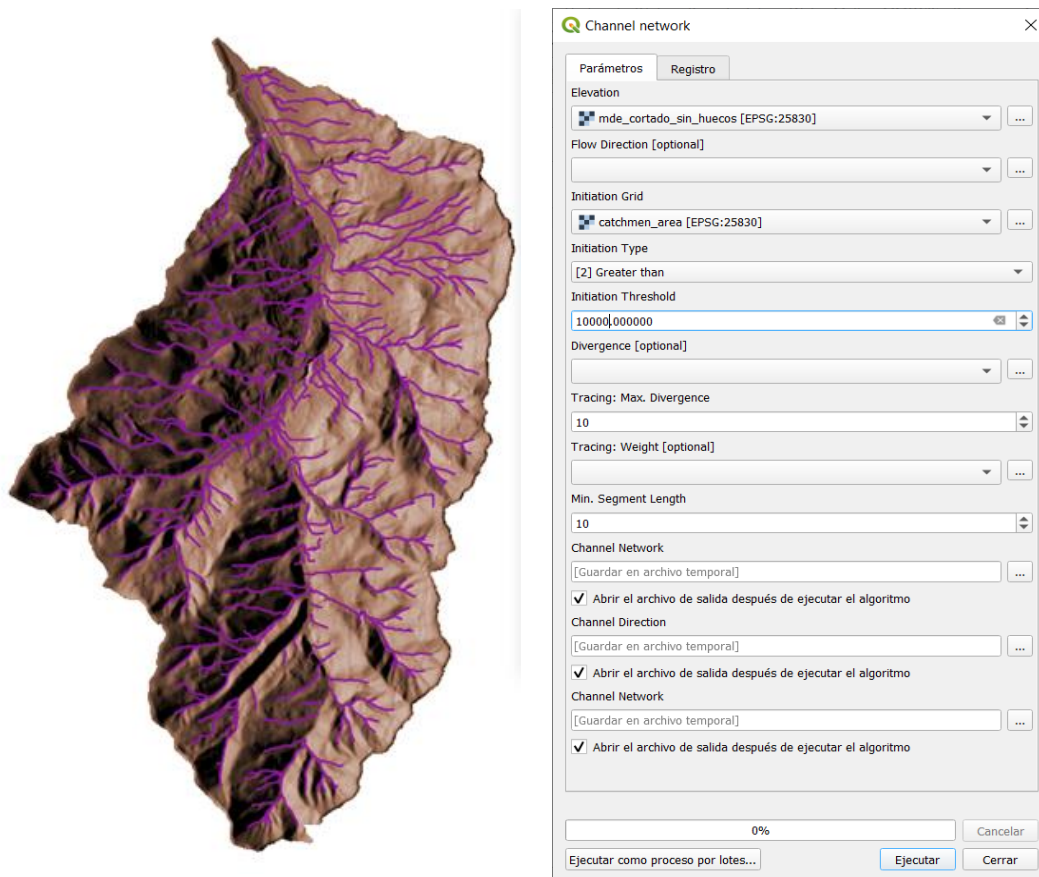


Figura 19. Red de cárcavas (líneas púrpuras) sobre MDE. Herramienta Channel Network con entradas proporcionadas.

En caso de plantear una red de cárcavas en escenario futuro se sigue el mismo procedimiento descrito anteriormente excepto el umbral de iniciación, que cambia a uno menor. El efecto de un umbral menor hace que para la formación de una cárcava se necesite menos área de captación derivando en potenciales cárcavas formadas en un futuro. Se puede interpretar cómo en umbrales elevados comparados con ortofotografía de 2009, las cárcavas no están tan evolucionadas en comparación con la ortofotografía actual que requiere umbrales menores.



Figura 20. Cárcava de umbral 33.000 sobre ortofotografía de 2009.



Figura 21. Cárcavas actuales con umbral 10.000 (azul claro) y cárcavas ya existentes en 2009 (azul oscuro) sobre ortofotografía PNOA máxima actualidad.

3.4.2.1 Filtrado de cursos de agua.

Para ambas cuencas una vez obtenidos las cárcavas como redes de drenaje se deben eliminar los cursos de agua superficiales que puedan haberse interpretado como cárcavas. Para ello se descargó la red hidrográfica vectorial desde la página web del MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).

Una vez disponible la red de canales principales en QGIS, mediante la herramienta *Buffer*, se genera una nueva capa vectorial para que englobe más fácilmente cárcavas que pueden no coincidir exactamente con geometrías.

Mediante la herramienta vectorial de geoproceto, *Diferencia*, se introduce como capa de entrada la que contiene a las cárcavas y como capa de superposición la que contiene

el *buffer*. De esta manera se genera una nueva capa vectorial con las cárcavas que no coinciden con las geometrías de arroyos y/o ríos.

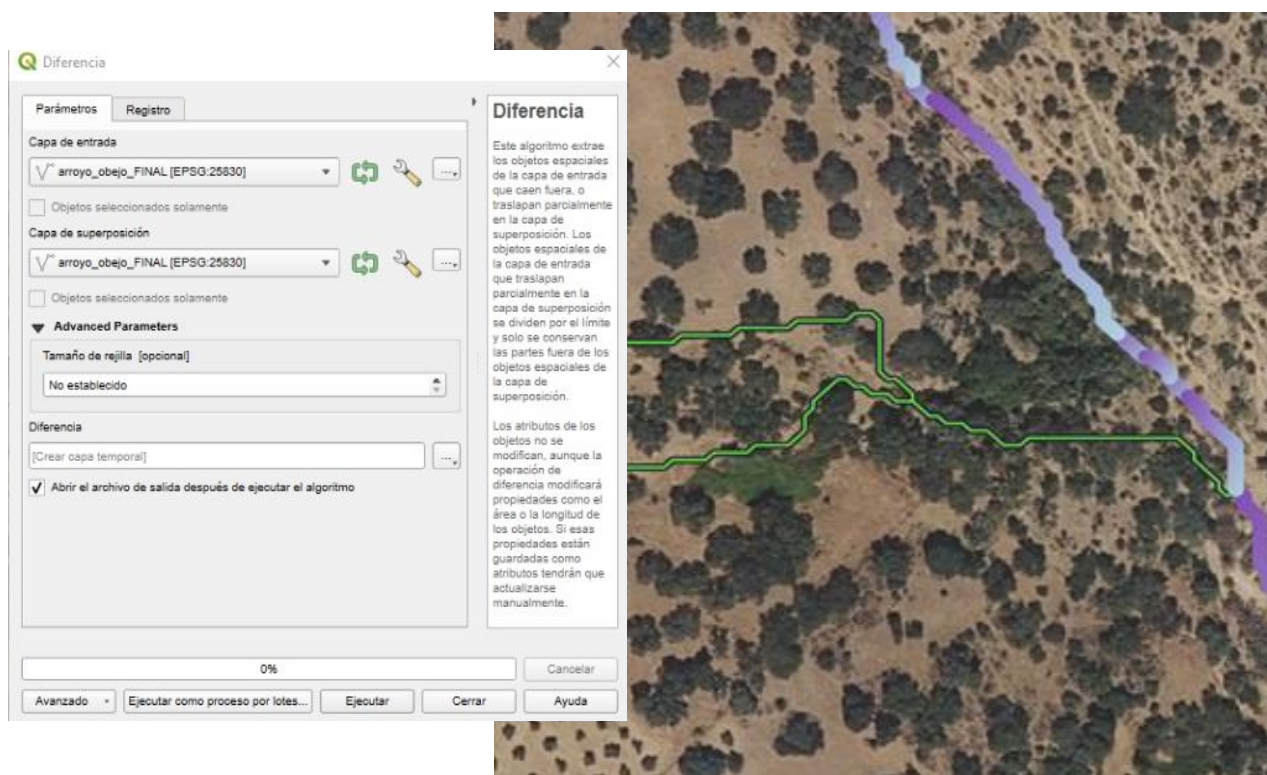


Figura 22. Filtrado de arroyos y ríos de la capa de cárcavas. Arroyo Obejo en púrpura como vectorial de tipo multipolígono y cárcavas extraídas por diferencia en color verde lima.

3.5 Relación de cárcavas con parcelas. Subcárcavas.

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 por formar parte de su red de desagüe. 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.

3.5.1 Adaptación de recintos y parcelas.

Desde la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía (Dirección General de Ayudas Directas y de Mercados. Consejería de

Agricultura, 2023) se obtuvo la capta vectorial de parcelas, recintos y otra información asociada a SIGPAC de los municipios donde se trabajó. El trabajo se llevó a cabo a nivel de parcelas, por lo que dentro de QGIS se agrupan los recintos por parcelas. Como el único dato variable que interesa de cada recinto para una misma parcela es la pendiente se aplica la media aritmética para la parcela. El proceso fue el siguiente:

1. Seleccionar parcelas y recintos pertenecientes a la cuenca hidrográfica. Mediante *Seleccionar por localización*, se seleccionan los objetos de la capa con parcelas eligiendo las geometrías que intersecan comparado con la cuenca vectorial. Luego en la capa de las parcelas se exportaron los objetos seleccionados (Figura 23).
2. Agrupar los recintos en parcelas a los que pertenecen. En las herramientas vectoriales de geoprocreso se elige *Disolver*. La capa de entrada es la obtenida anteriormente de recintos seleccionados, en *Disolver campo(s)* se seleccionan los atributos correspondientes al número de polígono y parcela.

El resultado es la agrupación de diferentes recintos, pero contenidos en la misma parcela (y mismo polígono). No se aplica municipio ya que en cada cuenca pertenecen a un mismo municipio.

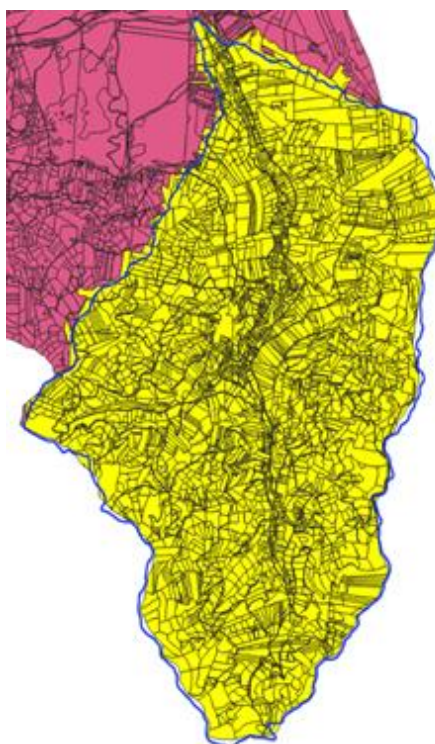


Figura 23. Filtrado de parcelas contenidas en la cuenca del arroyo.

3.5.2 Cálculo de pendiente media por parcela.

A partir de las pendientes obtenidas en el apartado 3.4.1.2 se calculó el promedio de cada parcela de la siguiente manera:

Empleando la herramienta de QGIS, *Estadísticas de zona*, se introdujo como capa de entrada la que contiene las parcelas y como capa ráster las pendientes corregidas. Como prefijo se puede emplear "LiDAR_", como estadística a calcular se selecciona *Media*.

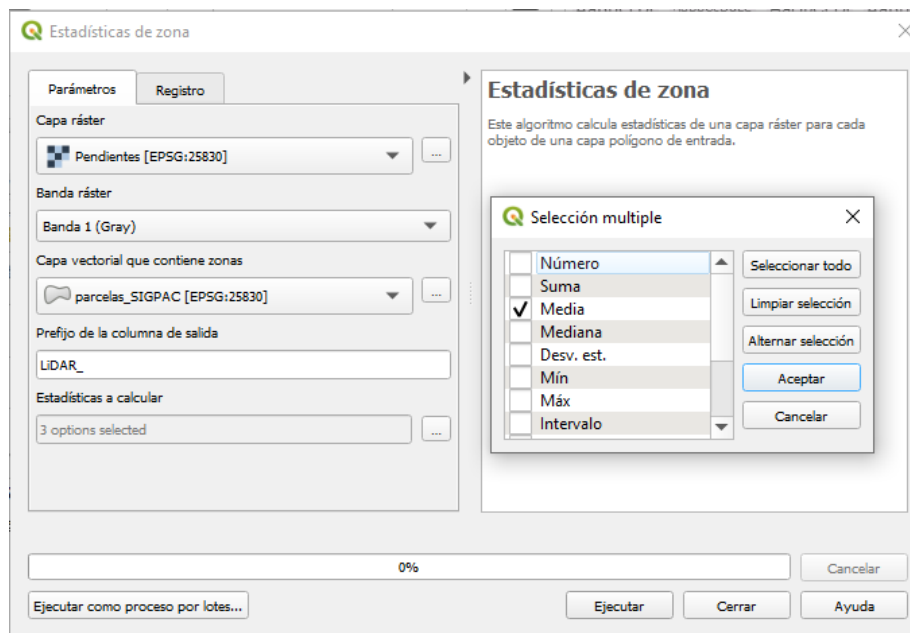


Figura 24. Extracción de pendientes de ráster para cada elemento vectorial, parcelas.

La superficie que comprende cada parcela se calculó a través de la *Calculadora de atributos* generando un nuevo campo vectorial llamado "area_m2", usando la expresión $\$area$ (por defecto las unidades ya están en metros)

El índice POLPA es un recurso a nivel interno para poder enlazar posteriormente datos vectoriales en la relación cárcava-parcela. Como posteriormente los datos vectoriales de las parcelas se van a exportar a la base de datos PostgreSQL (PostGIS Project Steering Committee, 2023) se necesita un índice único sin valores repetidos. Se genera por concatenación los valores de polígono y parcela. Se creó

un nuevo campo vectorial con tipo de dato entero tal y como se muestra en la Figura 25.

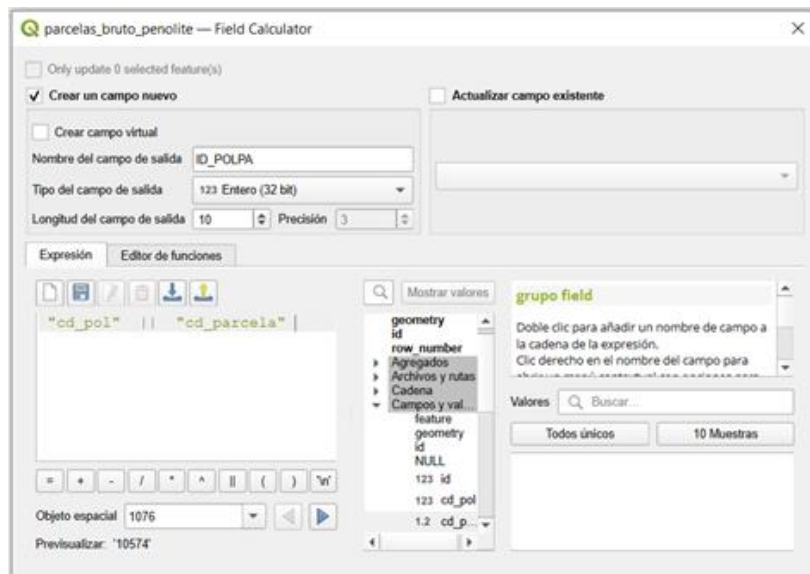


Figura 25. Creación índice 'ID_POLPA'.

Para facilitar el acceso a la información en procesos posteriores una vez se importe la capa de parcelas a una base de datos es necesario generar un índice numerado sin que se repitan valores. Se genera creando un nuevo campo vectorial de tipo entero mediante la función $\$id$ en la *Calculadora de campos*.

Para agilizar el manejo y procesado de datos, las capas de parcelas y cárcavas se importaron a una base de datos en PostgreSQL (PostGIS Project Steering Committee, 2023), cuya estructura ya configurada permite una rápida conectividad en QGIS.

Desde QGIS se utiliza la herramienta *Export to database* tal y como se muestra en la Figura 26 importante introducir 'id' como *Campo de clave*.

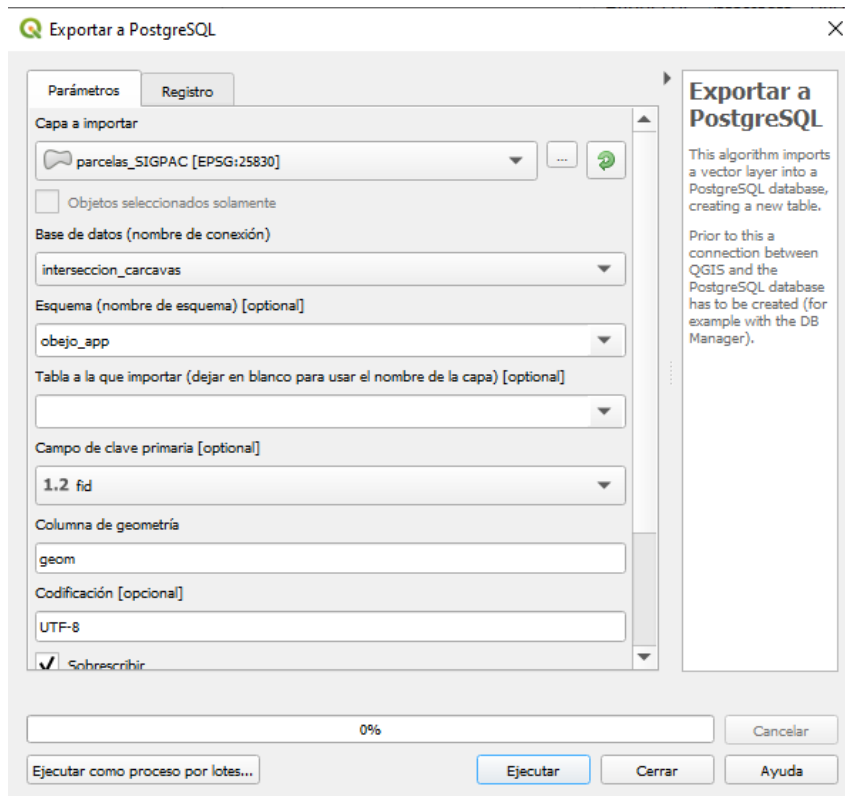


Figura 26. Exportar capa vectorial a PostgreSQL.

3.5.3 Generación de subcárcavas y conectividad.

De forma interna, se consideran *subcárcavas* a aquellas partes de una cárcava que se encuentran en diferentes parcelas, de esta manera se facilita la obtención de datos de las cárcavas a nivel parcela, pero manteniendo íntegra la información propia de la cárcava. Será sobre las subcárcavas donde se procesen los productos finales.

Un paso previo fue crear un identificador único de cárcavas denominado 'ID_CARCAVA'. Se empleó la función *\$id* de la Calculadora de campos. El índice POLPA es un recurso a nivel interno para poder enlazar posteriormente datos vectoriales en la relación cárcava-parcela. Los datos vectoriales de las parcelas se exportaron a la base de datos PostgreSQL ((PostGIS Project Steering Committee, 2023).

3.5.3.1 Generación de subcárcavas

En QGIS a través del geoproceso *Intersección*, de cárcavas (multilíneas) con parcelas (polígonos), se generó una nueva capa vectorial que contiene información tanto de parcelas como de cárcavas, se renombra como subcárcavas. Posteriormente se generó un nuevo índice 'id' para exportar a la base de datos (función $\$id$ de la Calculadora de campos, QGIS)

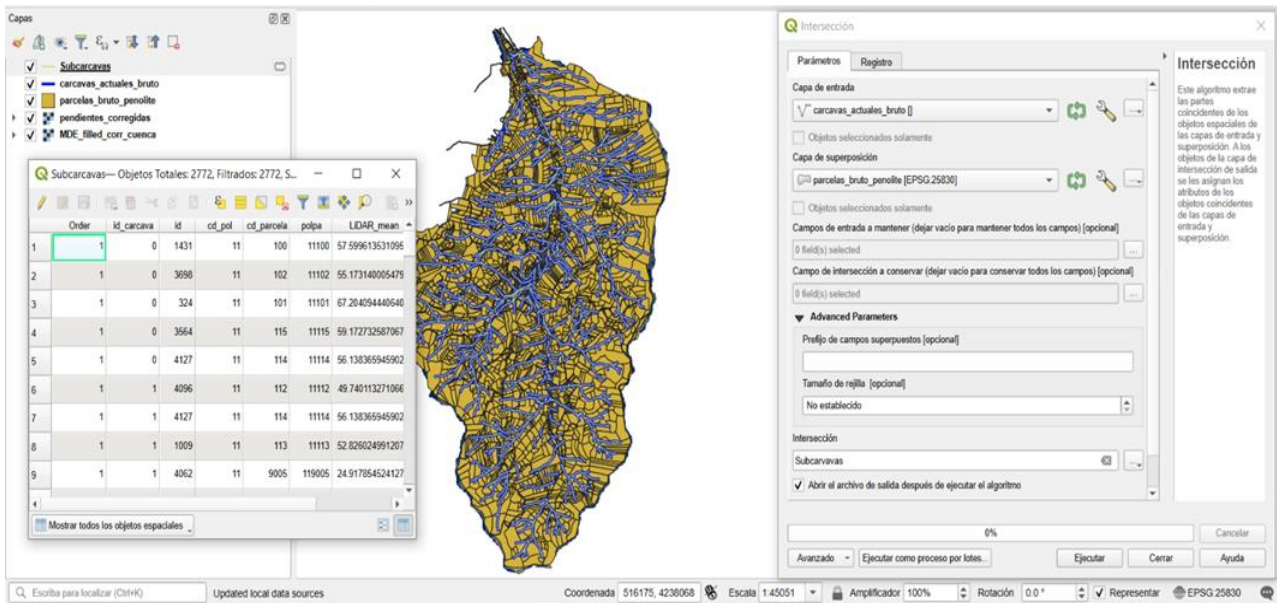


Figura 27. Generación de subcárcavas por intersección de cárcavas con parcelas. Detalle que se han unido atributos de ambas capas vectoriales en elementos relacionados.

3.5.3.2 Nodos de cárcavas.

Es necesario generar nodos, estos nodos van a contener la información de las cárcavas (no subcárcavas) donde se unan, para posteriormente calcular la conectividad inmediata entre cárcavas. Esto se realiza mediante la herramienta *Intersección de líneas* y donde las entradas son la misma capa de cárcavas (Figura 28).

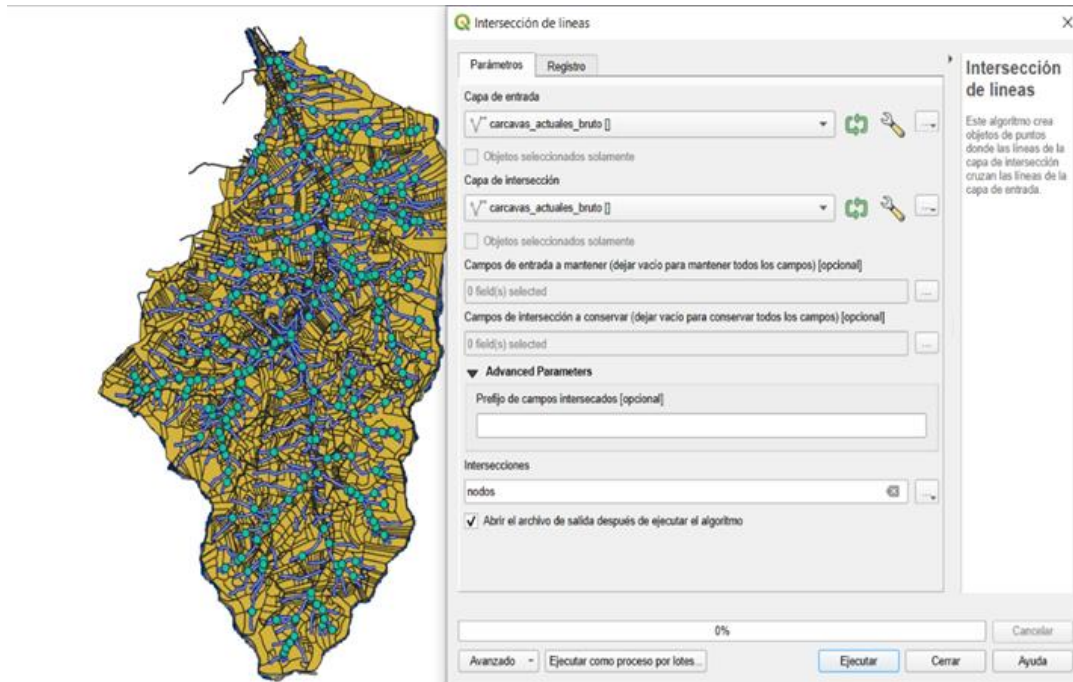


Figura 28. Generación de nodos (uniones de cárcavas).

Los nodos y las subcárcavas se exportaron a la base de datos. En *PostGIS* se realizaron los siguientes procesos a través de consultas SQL:

1. Creación índice ID_SUBCARC.

Algunas subcárcavas, pueden ser fragmentos de una misma cárcava, por lo que su ID_CARCAVA se repite. Para evitar confusiones y facilitar la localización de las subcárcavas se generó un subíndice de subcárcavas formado de la siguiente manera:

ID_CARCAVA + _ + [NÚMERO DE SUBCÁRCAVA]

```

ALTER TABLE curso.subcárcavas_bruto ADD COLUMN id_subcarc
VARCHAR;

UPDATE curso.subcárcavas_bruto AS t
SET id_subcarc = s.id_cárcava || '_' || s.subíndice
FROM (
    SELECT id, id_cárcava, ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY
id_cárcava ORDER BY id) AS subíndice
    FROM curso.subcárcavas_bruto
) AS s
WHERE t.id = s.id;

```

Figura 29. Consulta para generar identificaciones de subcárcavas.

2. Conectividad entre cárcavas.

Cuando las cárcavas están conectadas entre ellas, puede resultar muy útil saber qué cárcavas al unirse han formado la cárcava estudiada o cómo evoluciona la cárcava aguas abajo. El impacto de las actuaciones en una cárcava puede repercutir en varias aguas abajo, por lo que cobra más sentido conocer cómo están conectadas las cárcavas. Al tener los nodos de unión de cárcavas se tiene la información de *order* e *id_carcava* que confluyen en ese punto, mostrando cómo cárcavas de *order* inferior se suman para generar una nueva cárcava con *order* superior

```
-- Llena la tabla 'relaciones_carcavas' con cárcavas precedentes.
INSERT INTO curso.relaciones_carcavas (id_carcava, precedentes)
SELECT
    id_carcava,
    ARRAY_AGG(id_carca_1) AS precedentes
FROM
    (
        SELECT
            id_carcava,
            id_carca_1,
            ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY id_carcava ORDER BY "order_2"
DESC) AS rn
        FROM
            curso.nodos
    ) AS subquery
WHERE
    rn = 1
GROUP BY
    id_carcava;

-- Llena la tabla 'relaciones_carcavas' con cárcavas sucesivas.
UPDATE curso.relaciones_carcavas r
SET sucesivas = subquery.sucesivas
FROM (
    SELECT
        id_carcava,
        ARRAY_AGG(id_carca_1) AS sucesivas
    FROM
        (
            SELECT
                id_carcava,
                id_carca_1,
                ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY id_carca_1 ORDER BY "order"
DESC) AS rn
            FROM
                curso.nodos
        ) AS subquery
    WHERE
        rn = 1
    GROUP BY
        id_carcava
) AS subquery
WHERE
    r.id carcava = subquery.id carcava;
```

Figura 30. Consulta SQL para generar conectividad de cárcavas para precedentes y sucesivas/posteriores.

3. Incorporación de conectividad a la capa de cárcavas.

Una vez conseguida la información de conectividad, esta se agrega a las cárcavas mediante consulta en SQL donde para cada *id_carcava* coincidente se unan los datos.

```
ALTER TABLE curso.subcarcavas_bruto
ADD posteriores INTEGER[],
ADD anteriores INTEGER[];

UPDATE curso.subcarcavas_bruto AS c
SET
    posteriores = r.precedentes,
    anteriores = r.sucesivas
FROM curso.relaciones_carcavas AS r
WHERE c.id_carcava = r.id_carcava;
```

Figura 31. Consulta en SQL para unir conectividad con las subcárcavas actuales.

3.5.4 Datos asociados a subcárcavas.

Para facilitar la toma de decisiones a la hora de instalar albarradas y analizar cárcavas, se generaron una serie de datos adicionales relacionados con la cárcava que resultan de interés para su mejor caracterización ayudando a la toma de decisiones.

1. Longitud de tramo

La longitud de tramo de subcárcava se calcula a través de la tabla de atributos de la capa vectorial, generando un nuevo campo llamado 'longitud_m'.

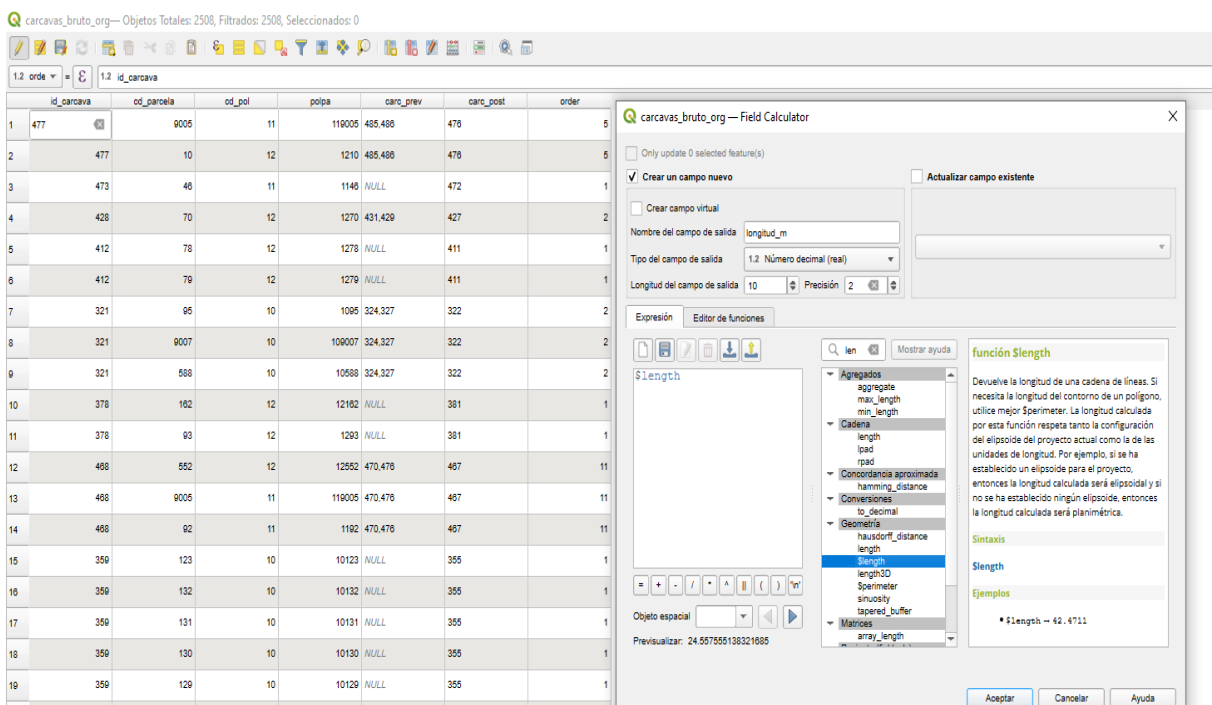


Figura 32. Creación de campo 'longitud_m'. Longitud en metros del tramo de subcárcavas.

2. Pendiente lineal del tramo de subcárcava.

La pendiente lineal en porcentaje del tramo de subcárcava se genera en un nuevo atributo "pendiente_" a través de la calculadora de campos vectorial. A través del MDE se obtiene la elevación del punto inicial y final, cuya diferencia de altura se divide por la longitud de la subcárcava.

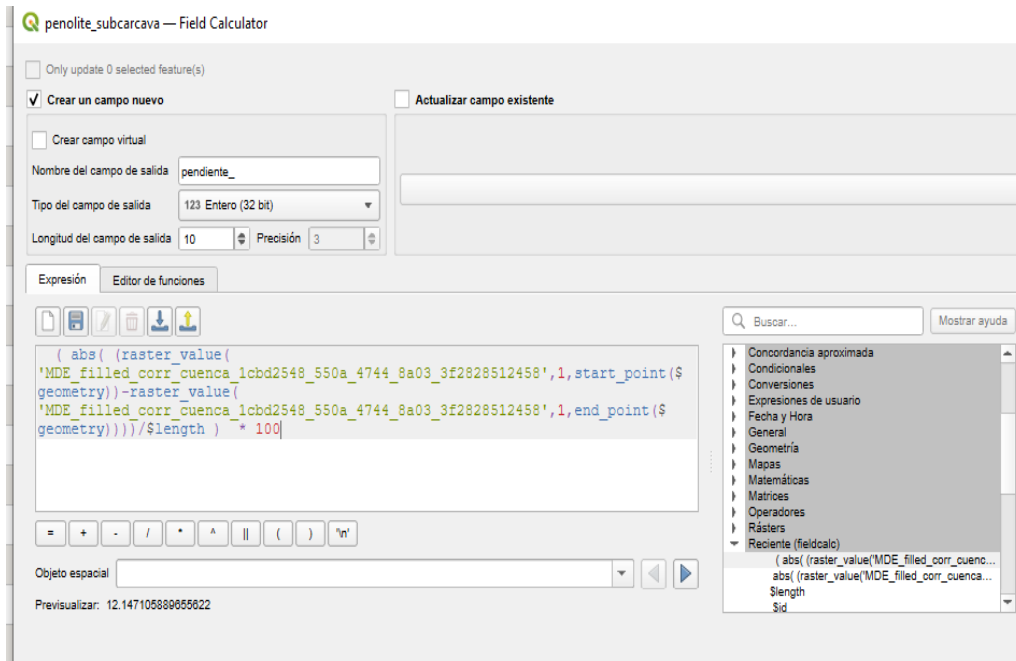


Figura 33. Generación de pendiente lineal en porcentaje.

3. Ancho estimado de cárcava.

El ancho de la cárcava se ha estimado por la correlación entre el *order* y dimensiones tipo obtenidas en campo. Los *orders* de mayor valor corresponderán a cárcavas de mayores dimensiones (ancho y/o profundidad).

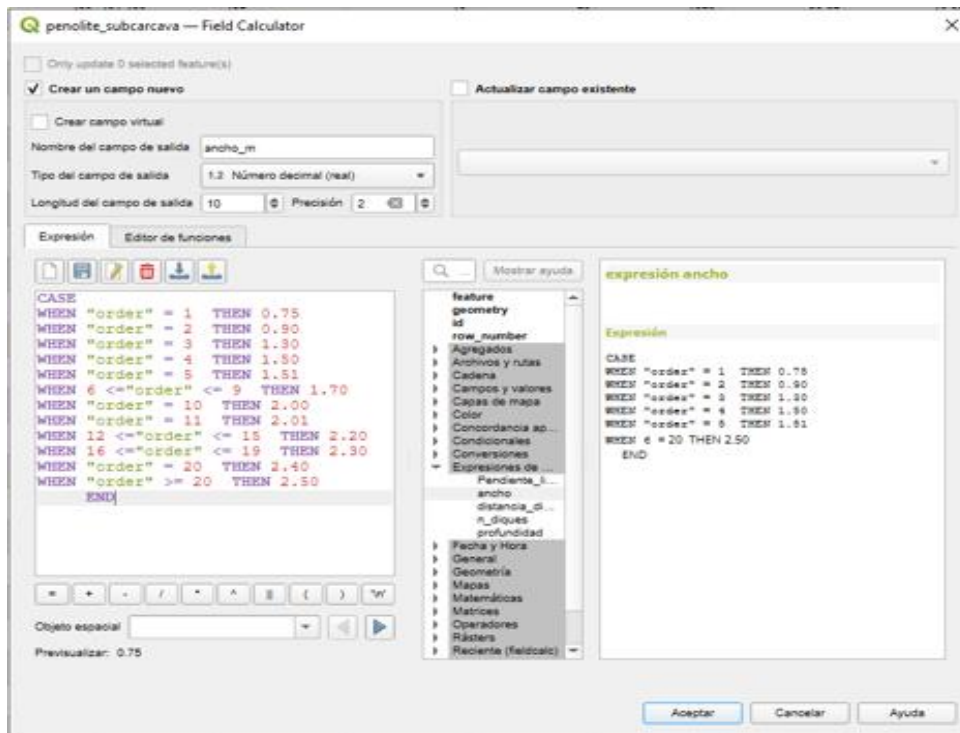


Figura 34. Clasificación y obtención del ancho de cárcava según su 'order'.

4. Profundidad de la cárcava.

Al igual que el ancho de cárcava, la profundidad de la cárcava se calcula a partir de su *order* correlacionado por mediciones en campo de cárcavas clasificadas en cada *order*.

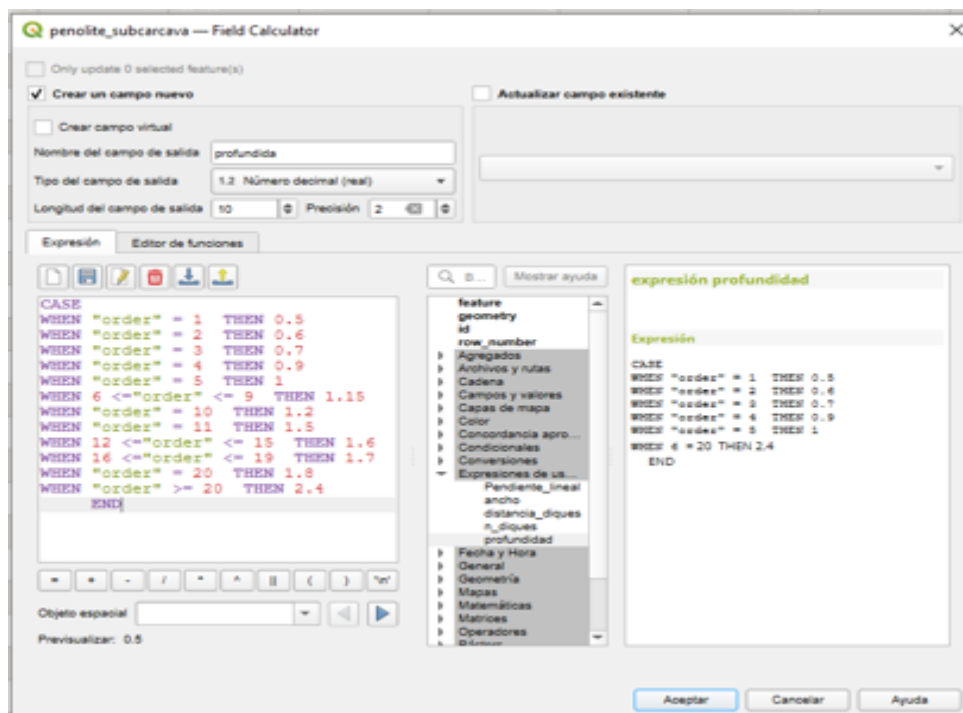


Figura 35. Obtención de la profundidad de la subcárcava según su 'order'.

5. Número de albarradas.

El número de albarradas que deben colocarse en una cárcava para servir de elemento de retención de sedimentos, se calcula en función la distancia entre barreras. Se considera la pendiente de la cárcava "pendiente_", profundidad de la cárcava "profundidad" como altura de albarrada y solape de barreras considerado en un 50%, que es un valor conservador apropiado para una primera intervención, aunque el usuario puede elegir este valor según los criterios corrección que se consideren. A partir de la ecuación (1) (Gómez et al., 2019), se calcula el número de albarradas como el número de barreras entre 2, ya que contarán las empalizadas (barreras naturales con restos de poda), situadas entre albarradas.

$$n_{albarrada} = \frac{\text{Longitud tramo cárcava (m)}}{\left(\frac{\text{Altura de dique(m)}}{(\text{pendiente \%} \times \text{Solape \%})/100}\right) / 2} \quad (1)$$

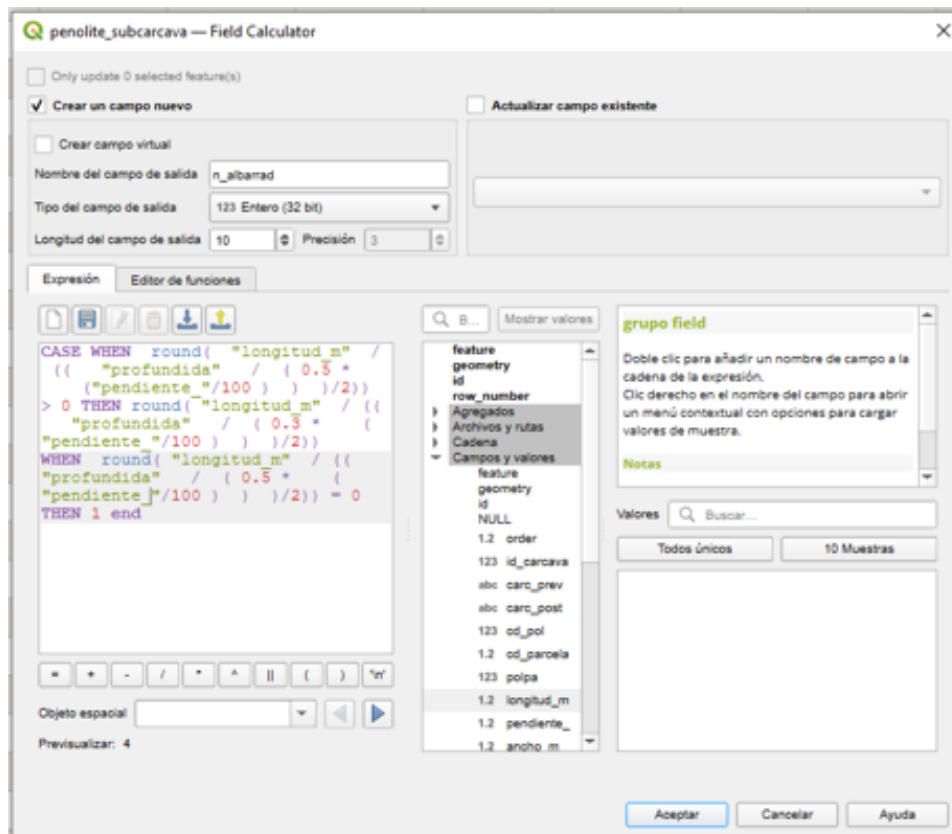


Figura 36. Cálculo de número de albarradas

6. Número de empalizadas.

Las empalizadas, como barrera filtrante son recomendables entre albarradas, ya que actúan como un filtro para a un coste mucho menor que las obras con piezas modulares u otros métodos constructivos. Se siguió la misma metodología vista en el punto anterior para las albarradas. En caso de obtener valores nulos no es necesaria su instalación.

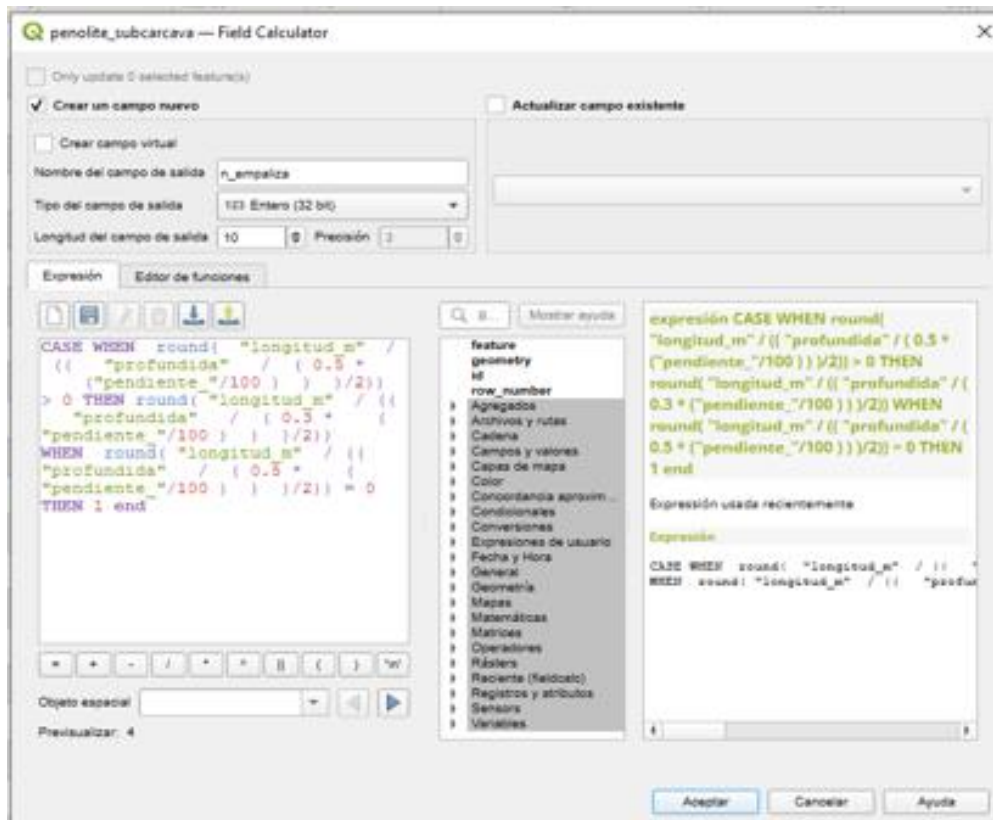


Figura 37. Cálculo de número de empalizadas.

7. Pérdida unitaria de suelo por metro lineal (m³/m).

Se considera una sección rectangular para la cárcava, por lo que por cada metro recorrido se pierde el volumen correspondiente a la sección por la longitud. Se calcula como la superficie de la sección transversal: *anchura* (m) * *profundidad* (m).

8. Longitud total de una cárcava.

Se suman las longitudes de las subcárcavas con mismo 'ID_CARCAVA'. Para ello se trabaja desde PostgreSQL.

```

-- Creación de columna nueva de longitud total
ALTER TABLE penolite.penolite_subcárcava
ADD COLUMN long_total DECIMAL(10,2);

UPDATE penolite.penolite_subcárcava AS p
SET long_total = (
    SELECT COALESCE(SUM(DISTINCT longitud_m),0)
    FROM penolite.penolite_subcárcava AS subp
    WHERE subp.polp=p.polpa
);

-- En caso de tener valores monoparte de longitud, que se repiten,
-- esto suma los valores únicos para la longitud de la cárcava.

```

Figura 38. Consulta SQL para obtener la longitud total de una cárcava

3.6 Vuelo RGB con UAV

El departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática de la Universidad de Córdoba apoyó este trabajo con vuelos RGB y LiDAR en UAV y el procesado de los productos obtenidos con el fin de obtener datos más precisos de las zonas de estudio. La metodología empleada es la siguiente.

En los vuelos UAV-RGB se empleó una plataforma DJI Mavic 2-Pro con un peso de 907gramos, con sistema de detección de objetos omnidireccional, empleando como sistema GNSS para posicionamiento datos procedentes de GPS y *Glonass*. La plataforma UAV embarca un sensor RGB Hasselblad L1D-20c con una distancia focal de 24 mm ofreciendo imágenes a MP, registrando imágenes de 5472x3648 píxeles.

Se siguió un flujo de trabajo diferenciado en tres fases (Figura 39): i) Planificación, ii) Trabajos de campo, iii) Procesado fotogramétrico. Primero se realizó una correcta planificación del vuelo para registrar imágenes que presenten unas características en su captura que garanticen posteriormente su correcto procesado y generación de productos cartográficos. En los trabajos de campo, previo a la realización del vuelo, resulta necesario registrar las coordenadas de un conjunto de puntos de apoyo o *ground control points* (GCP) que junto con las imágenes registradas serán empleadas en la obtención de los productos cartográficos MDE y ortomosaico RGB.

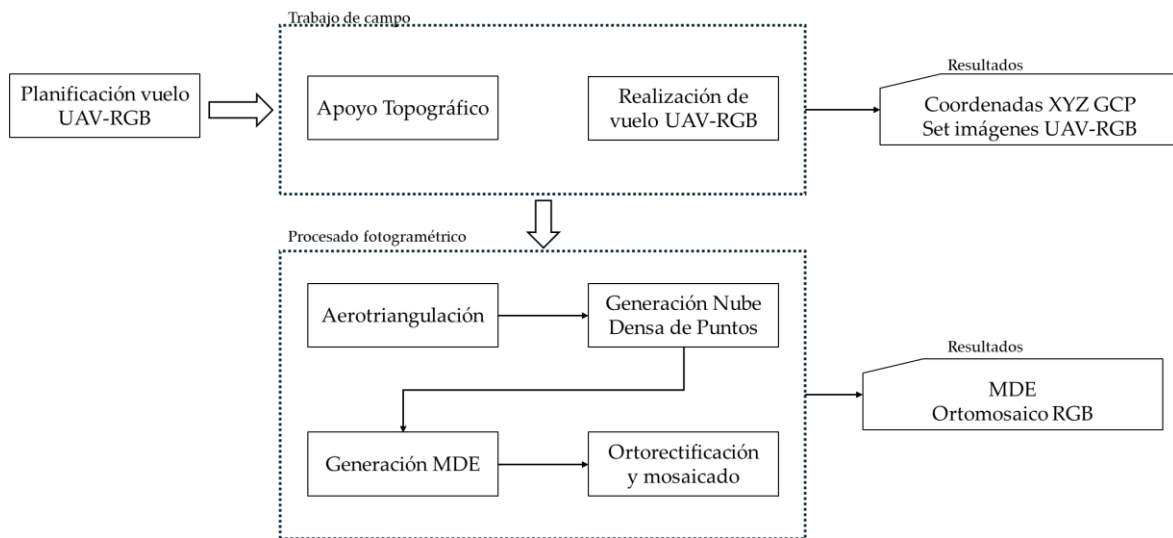


Figura 39. Flujo de trabajo vuelos UAV-RGB.

3.6.1 Planificación de vuelo UAV- RGB

Como paso previo se realizó un análisis del relieve de la zona de trabajo con objeto de garantizar tanto la seguridad como la viabilidad técnica de la operación de vuelo. A través del modelo digital de elevaciones del programa PNOA-LiDAR (Instituto Geográfico Nacional, 2023b) distribuido mediante servicio WCS se descargó el ámbito de la zona de estudio para a continuación evaluar alturas máximas y mínimas para analizar la posibilidad de realizar un único plan de vuelo o diferentes en caso de que las diferencias de GSD según relación de altura terreno y plataforma UAV superase el 20%. Por otro lado, se verificó que la zona de vuelo se encontrase sin restricciones al vuelo, consultando el servicio ENAIRE (<https://drones.enaire.es/>) del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible.

La altura de vuelo sobre el terreno se estableció en 120 m, resultando en un GSD igual a 2.0 cm. Los solapes longitudinales y transversales se establecieron en el 90% y 80% respectivamente al objeto de garantizar la calidad espacial de los productos cartográficos a generar posteriormente. El ángulo de disparo de la aeronave coincidió con el de la dirección de movimiento de la pasada. Finalmente, en cuando al modo de registro de las imágenes se optó por registrar las imágenes en modo dinámico con objeto de maximizar el rendimiento de la aeronave en vuelo, tomando una imagen a intervalos iguales de tiempo cada 2 segundos, siendo la velocidad de vuelo para estas condiciones igual a 5 m/s. Para todo lo relativo a la planificación se empleó la aplicación *DJI Ground Station*

Pro instalada sobre una *Tablet Ipad*, permitiendo tanto la planificación como la ejecución y seguimiento en tiempo real del vuelo (Figura 1. 113).

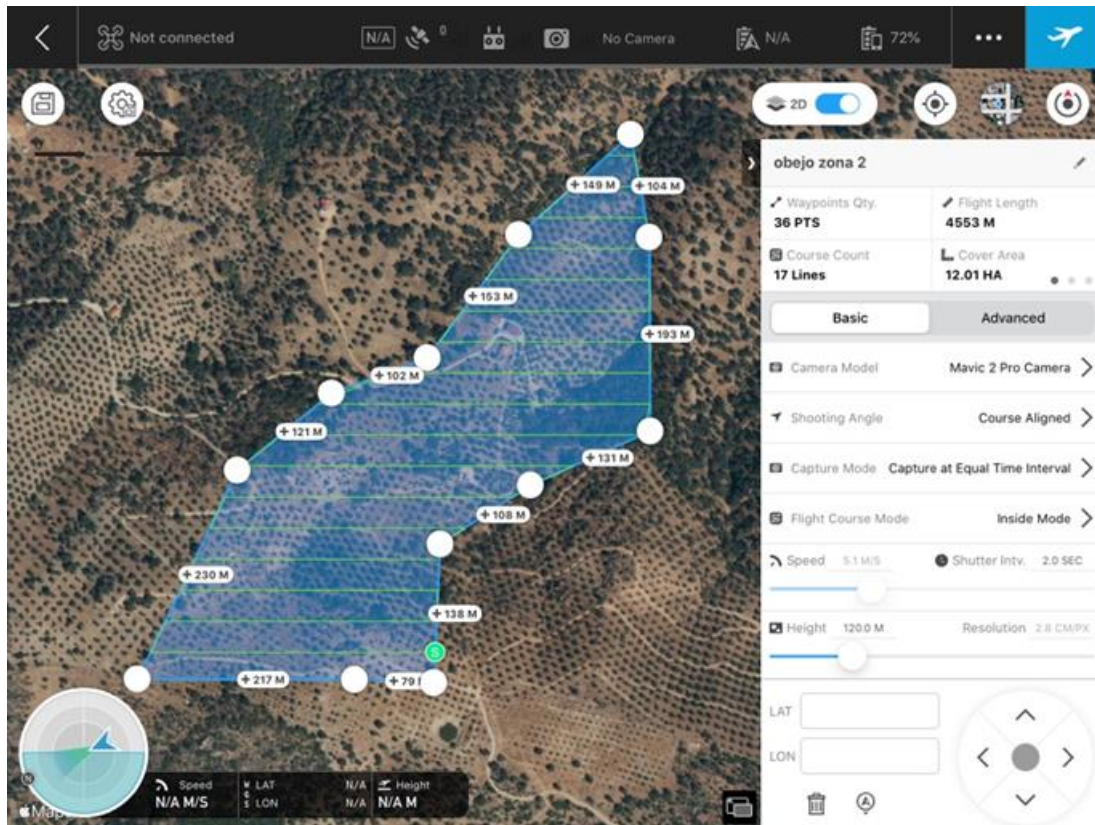


Figura 40. Ejemplo de planificación vuelo UAV-RGB mediante DJI Ground Control Station Pro

3.6.2 Trabajo de campo

Previo a la realización del vuelo UAV-RGB se midieron un conjunto de puntos GCP distribuidos en el perímetro de la zona de vuelo, abarcando toda la zona de vuelo, y uno en la zona de central con el objetivo de calcular los parámetros de orientación absoluta de forma exacta de cada una de las imágenes del vuelo en la fase de aerotriangulación, garantizando así la interoperabilidad geométrica de la cartografía UAV generada, siendo correctamente georreferencia al sistema de referencias de coordenadas EPSG:25830 (ETRS 89, UTM huso 30). Cada punto GCP quedó materializado artificialmente por un disco blanco de 30 cm de diámetro identificable manualmente en las imágenes en la fase de procesado. La medida de las coordenadas de los puntos se realizó mediante un receptor GNSS bifrecuencia Leica GS15, recibiendo correcciones diferenciales en tiempo real mediante el protocolo NTIP generadas por la Red Andaluza de Posicionamiento, teniendo una calidad en posicionamiento igual a ± 3 cm.

3.6.3 Procesado fotogramétrico del vuelo UAV-*RGB*

Se empleó como software fotogramétrico-UAV, Agisoft MetaShape v2.0.0 (Agisoft LLC, 2023). Una vez cargadas las imágenes de cada vuelo se procedió a realizar una aerotriangulación en modo relativo mediante los datos obtenidos por orientación directa para posteriormente importar las coordenadas de los puntos de apoyo y proceder a su identificación manual en las imágenes del vuelo. Una vez medidos todos GCPs (Figura 41) de realiza una transformación *Helmert* 3D permitiendo determinar la orientación absoluta de cada imagen de forma exacta y precisa referida al sistema de referencia de coordenadas EPSG 25830. Esta fase es clave para que el resto de las fases del procesado se desarrollen correctamente.

A partir de los resultados de la aerotriangulación se generó de forma automática una nube densa de puntos 3D de forma automática con objeto de modelar la superficie topográfica, así como de los objetos presentes en la zona de trabajo. A partir de estos datos se obtendría un modelo digital de superficie en formato ráster a emplear en la ortorrectificación diferencial de cada una de las imágenes del vuelo y su posterior mosaicado para obtener generar un ortomosaico de la zona de trabajo.

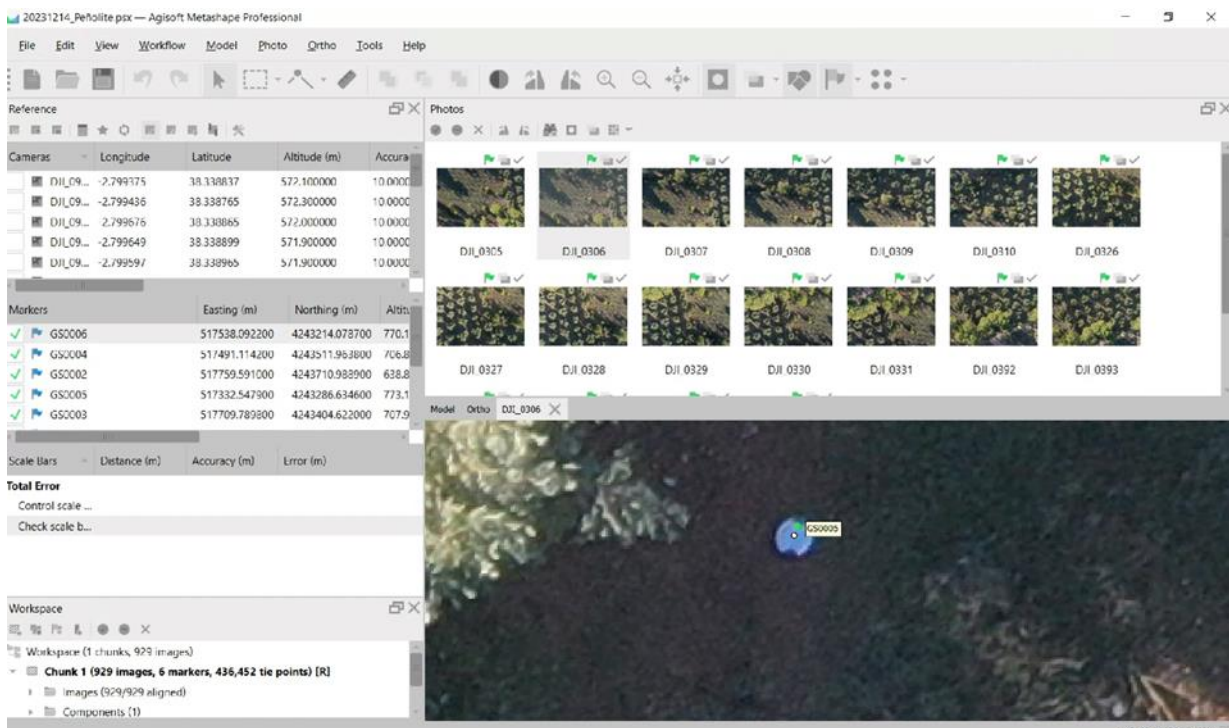


Figura 41. Identificación manual y registro de GCP sobre imagen.

3.7 Vuelo UAV-LiDAR

Para la realización de los vuelos UAV-LiDAR se ha usado una plataforma *DJI Mavic 300 RTK* con un peso de 6.3 Kg (incluidas dos baterías TB60), empleando como sistema GNSS para posicionamiento datos procedentes de GPS, *Glonass*, *BeiDou* y *Galileo*. Sobre dicha plataforma se embarcó un sistema LiDAR aéreo *DJI L1* con un alcance de detección de 450 m (80% de reflectividad) y 190 m (10% reflectividad), ofreciendo una frecuencia de escaneado de 240.000 puntos/segundo configurado en retorno único y 480.000 puntos/segundo en retorno múltiple (máximo 3), con una precisión de 3 cm a 100 m.

De forma similar al apartado 3.6 se diferencian tres fases de trabajo: i) Planificación, ii) Trabajos de campo y iii) Procesado de los datos LiDAR resumidas en la Figura 42. En primer lugar, resulta necesario realizar una correcta planificación del vuelo para que el registro de los datos garanticen la correcta generación de los modelos del terreno a generar. En los trabajos de campo, previo a la realización del vuelo se instaló antena GNSS para enviar correcciones en tiempo real a la aeronave durante la realización del vuelo. Dichas coordenadas se obtuvieron mediante receptor GNSS bifrecuencia *Leica GS15*, operando en RTK y recibiendo correcciones mediante protocolo NTRIP desde la Red de Posicionamiento de Andalucía de la Junta de Andalucía. Finalmente, los datos registrados en campo fueron tratados con objeto de generar un Modelo Digital de Elevaciones de la zona de vuelo.

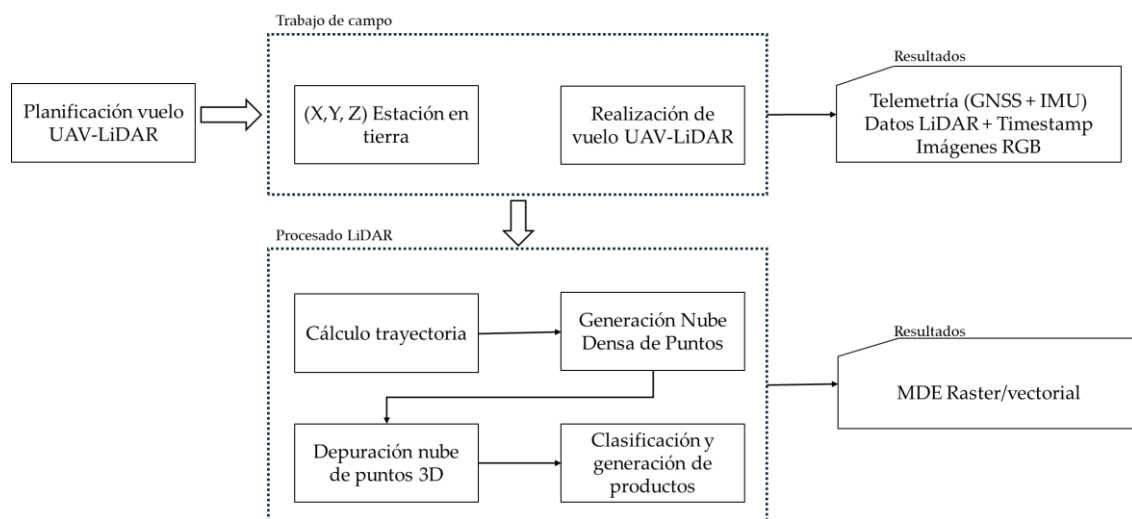


Figura 42. Flujo de trabajo vuelos UAV-LiDAR.

3.7.1 Planificación vuelo UAV-LiDAR.

Como paso previo se realizó un análisis del relieve de la zona de trabajo con objeto de garantizar tanto la seguridad como la viabilidad técnica de la operación de vuelo. A través del modelo digital de elevaciones del programa PNOA-LiDAR distribuido mediante servicio WCS se descargó el ámbito de la zona de estudio para a continuación evaluar alturas máximas y mínimas para analizar la posibilidad de realizar un único plan de vuelo o diferentes en caso de que las diferencias de GSD según relación de altura terreno y plataforma UAV superase el 20%. Por otro lado, se verificó que la zona de vuelo se encontrase sin restricciones al vuelo, consultando el servicio ENAIRE (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2023).

La altura de vuelo sobre el terreno se estableció en 100 m, resultando en una densidad de puntos igual a 125 puntos/m², para lo cual los solapes longitudinales y transversales se establecieron en el 80% y 50% respectivamente y una velocidad lineal de 7.9 m/s. Finalmente, en cuando al modo de escaneado se seleccionó el modo “no-repetitivo” con triple retorno y una tasa de muestreo de 160 KHz. Para todo lo relativo a la planificación se empleó la aplicación *DJI Ground Station Pro* instalada sobre una *Tablet* integrada en el radiocontrol de la aeronave, permitiendo tanto la planificación como la ejecución y seguimiento en tiempo real del vuelo.

3.7.2 Procesado fotogramétrico vuelo UAV-LiDAR

Para la generación de la nube de puntos LiDAR 3D a partir de las observaciones de los sub-sistemas LiDAR, IMU y GNSS se empleó el software DJI Terra. Esta nube de puntos en estado bruto fue tratada posteriormente con objeto de mejorar la coherencia relativa del conjunto de puntos y la generación de los productos de interés. Los trabajos desarrollados consistieron:

- Asignación de pasadas: A partir del *timestamp* asignado a cada punto y los datos procedentes de la unidad inercial y de posicionamiento se generaron los ficheros de trayectoria del vuelo, asignado cada punto a una de las pasadas realizadas.
- Ajuste entre pasadas: Reduce los desajustes entre trayectorias de vuelo solapadas, mejorando la precisión interna de la nube de puntos. Este paso

aplica un enfoque de concordancia característica a característica, buscando líneas de enlace, observaciones de correspondencia entre pasadas y minimizando el desajuste entre observaciones. El ajuste se descompuso en cuatro fases diferentes:

- Corrección por sesión: Ajuste sistemático específico para cada grupo de trayectorias con objeto de mitigar los errores de calibración de la IMU entre misiones de vuelo.
 - Corrección por pasada: Ajuste sistemático específico para cada línea de trayectoria.
 - Corrección fluctuante: Ajuste fluctuante que varía en el tiempo con objeto de reducir el efecto de la deriva del sistema de posicionamiento.
 - Corrección del ángulo del espejo: ajuste específico del ángulo del espejo para minimizar los errores de refracción del haz en ángulos de barrido elevados.
- Suavizado y eliminación de ruido, suaviza las superficies y clasifica los valores atípicos por encima y por debajo de las superficies como ruido. Para ello, se utiliza la información de color RGB asignada a los puntos láser para reconocer la vegetación, pudiendo aplicar el suavizado sólo a las zonas sin vegetación identificadas por el cálculo del índice de vegetación por diferencia de bandas visuales.
 - Clasificación de forma automática de los puntos pertenecientes al terreno, a partir de los cuales posteriormente generar los modelos que representan la superficie topográfica. El clasificador es sensible a los puntos de con cota baja erróneos presenten en la nube de puntos por lo que anteriormente se realizó un suavizado y eliminación de ruido. La lógica de la clasificación realizada comienza seleccionando puntos bajos locales que son seguros de pertenecer al terreno, definiendo un entorno de búsqueda de estos. A continuación, la rutina construye un modelo de superficie TIN a partir de los puntos iniciales del suelo. Los triángulos de este modelo inicial están en su mayoría por debajo del nivel del suelo y sólo los vértices tocan el suelo. En las iteraciones siguientes, la rutina moldea el modelo hacia arriba añadiendo cada vez más puntos. Cada punto añadido hace que el modelo se ajuste de forma más

adecuada a la verdadera superficie del suelo. Los parámetros de iteración de la rutina determinan lo cerca que debe estar un punto de un plano triangular para ser aceptado como punto del suelo y añadido al modelo.

El resultado final de todo este proceso es la clasificación de los puntos que pertenecen al terreno a partir de los cuales poder generar los modelos digitales que representan la superficie topográfica de la zona de trabajo.

3.8 Monitorización de la retención de sedimentos.

En este trabajo se aprovechó la circunstancia de la instalación de albarradas modulares (Pareja Funes et al., 2021) empleadas para interceptar y acumular los sedimentos que viajan en el flujo de la escorrentía concentrada en cárcavas. Estas albarradas modulares de hormigón están compuestas de tres porciones troncocónicas huecas en cuya base poseen un canto inferior con dimensiones mayores al canto superior. Estas cavidades troncocónicas están destinadas a alojar sedimentos y/o parcialmente una porción troncocónica del elemento modular de otra fila ya sea superior o inferior (Figura 43). Los elementos modulares son apilables entre sí de forma manual (peso de 20 kg) por lo que pueden formarse estructuras sin necesidad de maquinaria auxiliar ni mortero. Las piezas fueron desarrolladas en el proyecto INNOLIVAR de la Universidad de Córdoba y se la invención se encuentra patentada bajo la referencia ES 2 885 772 B2.

Tabla 4. Características técnicas de las piezas modulares para albarradas.

Longitud	40 cm
Grosor de elementos	1,5 cm
Altura	25 cm
Peso en seco	20 kg
Material	Hormigón

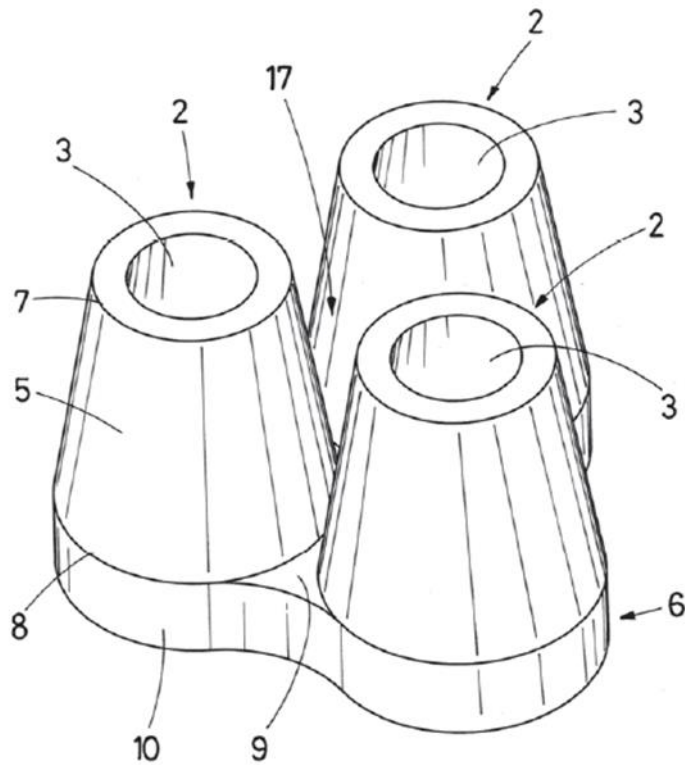


Figura 43. Figura de una pieza modular (Pareja Funes et al., 2021).

El cuenco de disipación hace que se pierda energía potencial por la diferencia de altura, atenuada por el paso sinuoso de la agua entre las piezas y la caída de agua en la estructura escalonada de piezas sucesivas.

A partir de los productos LiDAR y MDE obtenidos (ver 3.6 Vuelo RGB con UAV ;3.7 Vuelo UAV-LiDAR) se obtuvo la modelización tridimensional de la cárcava por parte del departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática de la Universidad de Córdoba.

A través del procesado de dos MDE obtenidos antes y después de la instalación de las albarradas mediante vuelo UAV, se obtuvo un archivo ráster generado por la diferencia entre esos MDE (proceso en la *Calculadora ráster*, QGIS). Ese ráster muestra las zonas de suelo retenido/perdido en metros, se empleó para considerar la efectividad de albarradas y monitorizar su retención de sedimentos.

3.9 Diagrama resumen de metodología.

En el siguiente diagrama (Figura 44) se muestra un resumen de la metodología empleada en este trabajo.

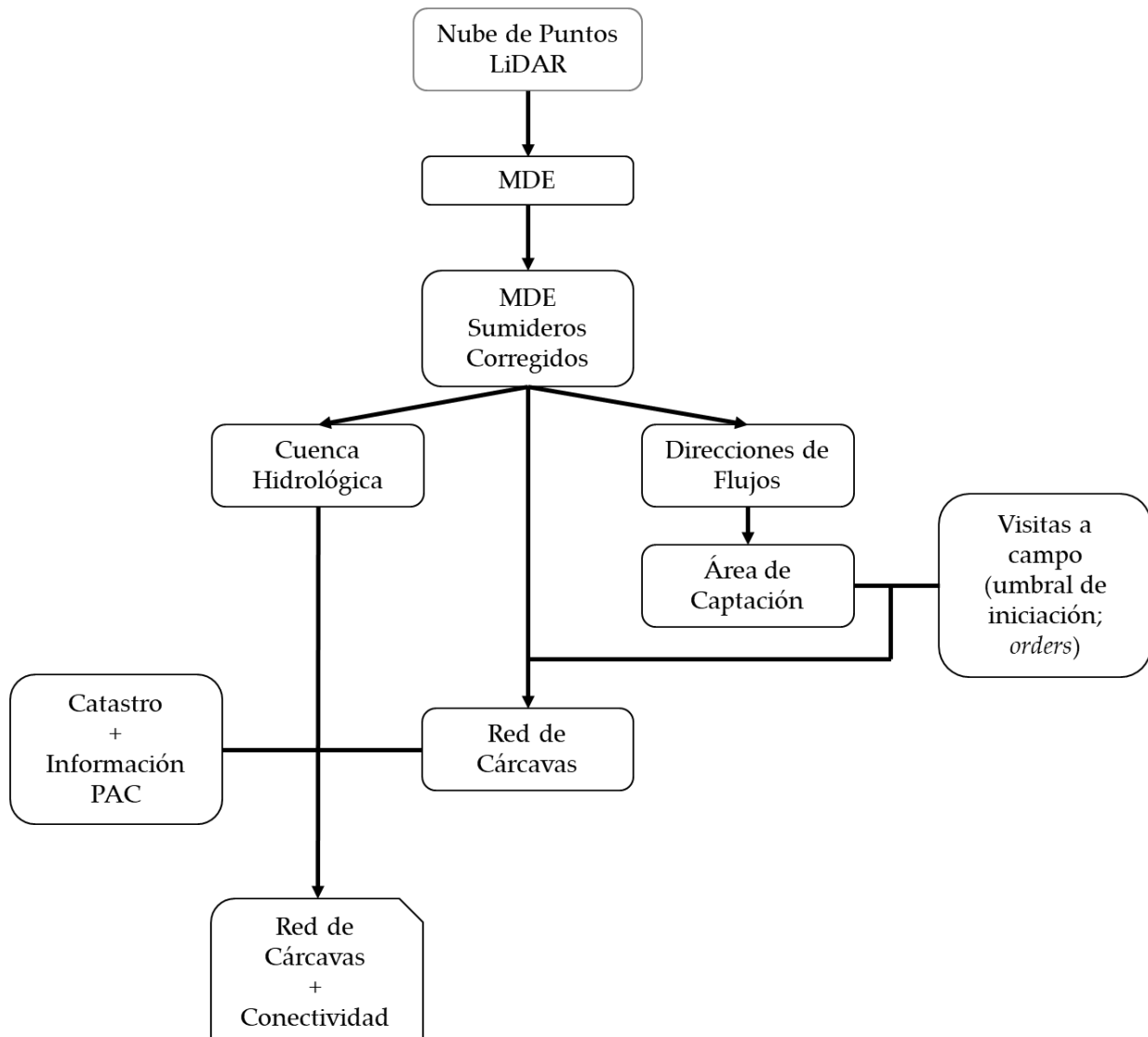


Figura 44. Diagrama resumen de metodología.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Selección de parcelas piloto.

Una vez obtenidos los mapas de acumulación de flujos, la delimitación de las posibles cárcavas y el filtrado de parcelas de olivar se procedió a la selección de parcelas piloto según los criterios expresados anteriormente. (Criterios para la elección de parcelas experimentales. En las diversas visitas a campo se contactó con varios agricultores interesados y se localizaron potenciales fincas de interés, así se acotó las zonas de análisis para la elección de parcelas.

4.1.1 Selección de parcela piloto en la cuenca de Obejo.

De entre cuatro propuestas se eligió una finca donde transcurre una cárcava de características interesantes donde divide dos parcelas (anteriormente una) de dos hermanos que llevan manejos diferentes del olivar: la parcela occidental lleva un manejo ecológico introduciendo ganado ovino y favoreciendo la cubierta vegetal espontánea permanente; mientras que la parcela oriental lleva un manejo tradicional con aplicación de herbicidas y control total de cubierta vegetal donde se apreciaron varias cárcavas efímeras.

A partir de la referencia catastral se seleccionó la primera parcela y mediante la metodología descrita (ver 3.1.1.1). La cárcava principal aparece delineada en la Figura 9. Las parcelas seleccionadas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parcelas seleccionadas como fincas piloto. Cuenca del arroyo Obejo.

Provincia	Municipio	Polígono	Parcela	Recinto (Olivar)	Área (ha)	Miembro asociado
14	47	8	99	3	1,14	Cooperativa
				5	1.60	
				6	0.23	
14	47	8	28	3	2.07	AGAPA

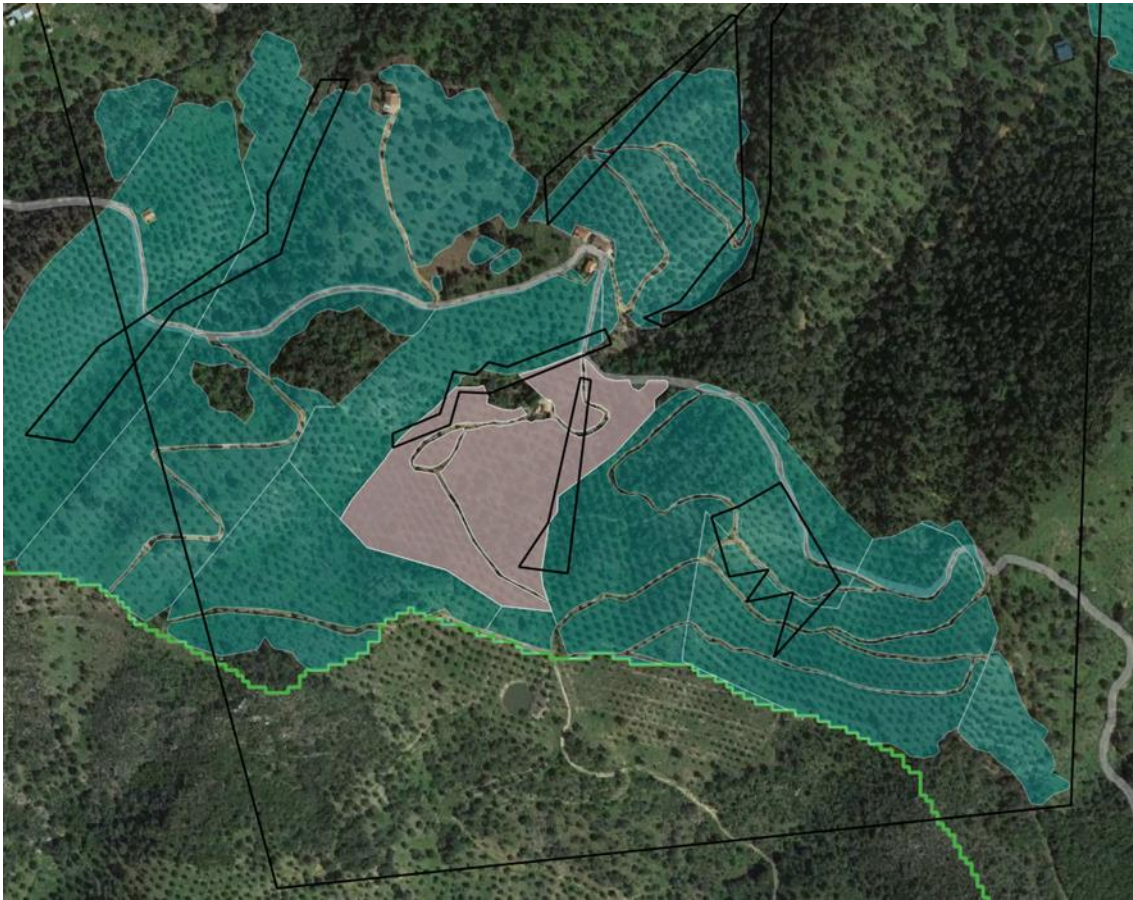


Figura 45. Cuarta propuesta de visita a finca. En negro las cárcavas de la zona. La cárcava de interés es la limítrofe entre la parcela rosada (proporcionada por la cooperativa) y una de las parcelas azules (proporcionadas por AGAPA).



Figura 46. Ampliación de la posible cárcava centrada en al imagen, delimitada por líneas negras.

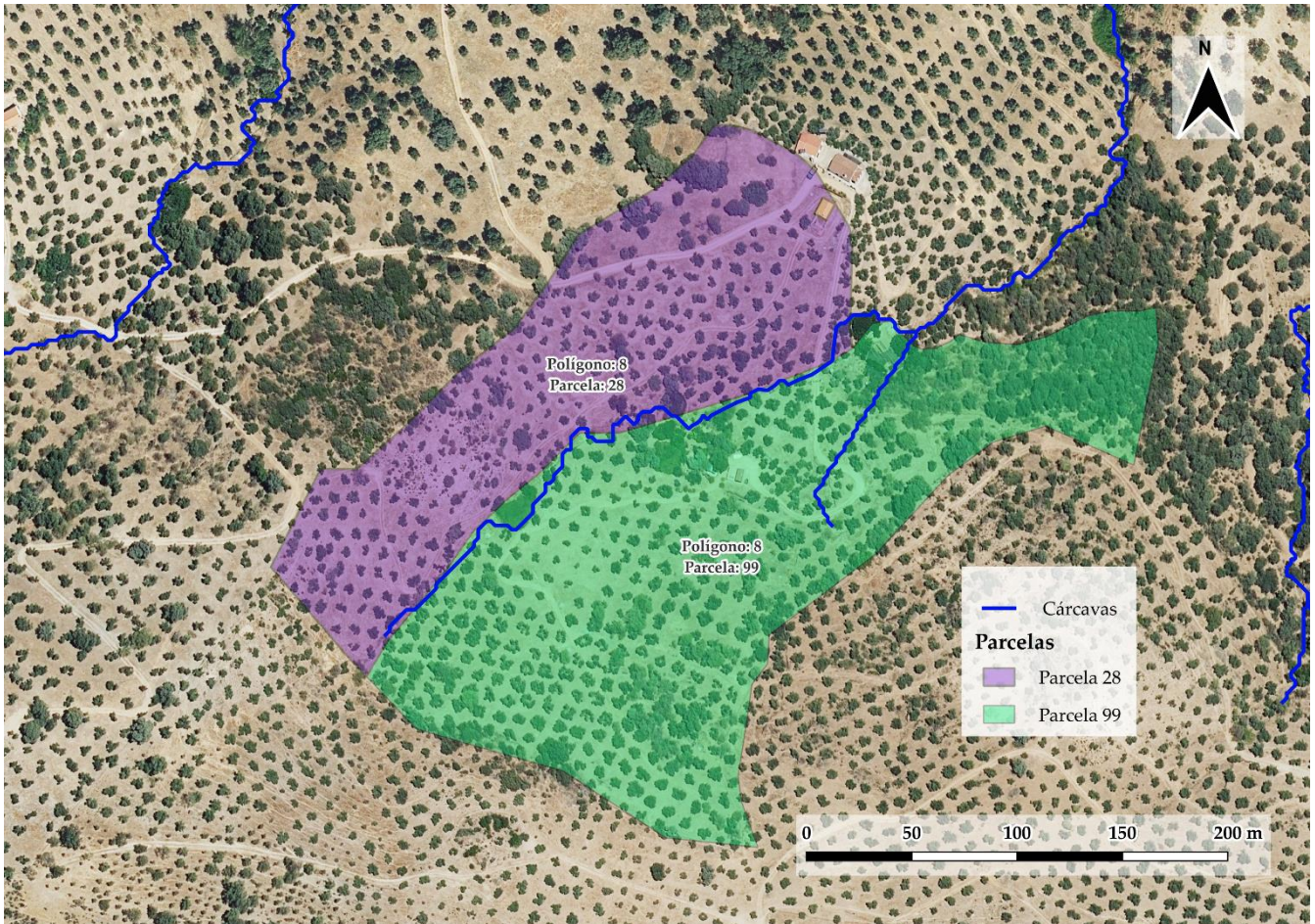


Figura 47. Mapa de parcelas seleccionadas. Detalle de cárcavas generadas automáticamente (azul).

4.1.2 Selección de parcela piloto en la cuenca de Peñolite.

A partir de la primera visita a fincas en la cuenca del arroyo Peñolite se tomaron localizaciones de referencia de cada parcela. Con estos datos se extrajo la información catastral y agrícola mediante la herramienta Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC, 2022).

Una vez se generaron los mapas de acumulación de flujo y pendientes, se delimitaron las zonas de posibles cárcavas mediante polígonos vectoriales. Se siguieron los criterios de selección descritos en Criterios para la elección de parcelas experimentales.

En general, se observaron muchas zonas potenciales de estudio. Entre todas se seleccionó un grupo de parcelas afectadas por la misma cárcava con una anchura entre los 3 y 6 metros, con profundidad promedio de 1,7 metros. Es un caso de particular interés ya que un camino de tierra interrumpe el curso natural de la cárcava, que inmediatamente, aguas abajo adquiere una gran profundidad de una sección rectangular (ver Figura 48).

Cabe destacar que el olivar presentaba cubierta vegetal en la mayor parte de la superficie, zonas improductivas potenciales de transformación en islas de biodiversidad, cambios de nivel que frenan la escorrentía. No obstante, aguas abajo, en concreto antes y después del camino, las cárcavas tienen mucha profundidad, y el perfil del suelo es mayor.



Figura 48. Cárcava situada aguas abajo, vistas hacia el camino y parcelas piloto.

Tabla 6. Parcelas seleccionadas como fincas piloto. Cuenca del arroyo Peñolite.

Provincia	Municipio	Polígono	Parcela	Área (ha)	Miembro asociado
23	71	8	64	0,39	Cooperativa
23	71	8	43	0,61	Cooperativa
23	71	8	567	0,30	Cooperativa

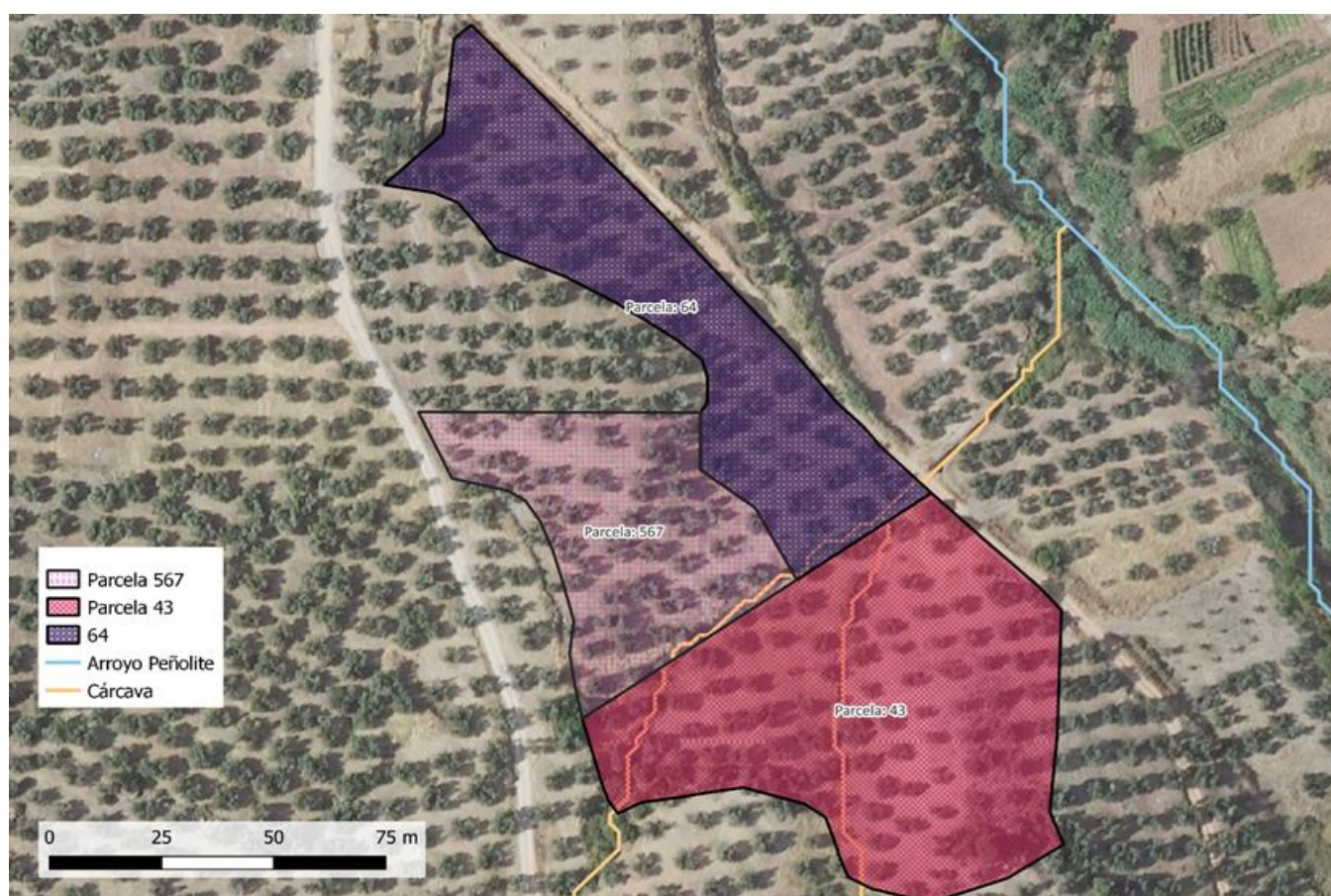


Figura 49. Mapa de parcelas seleccionadas. Detalle de cárcavas generadas automáticamente (naranja).

4.2 Modelo Digital de Elevaciones.

Como resultado se obtiene un archivo ráster de formato *GeoTIFF* con resolución espacial de 2x2 metros, georreferencia en el sistema de referencia de coordenadas EPSG:25830 - ETRS89 / UTM zona 30N. Para verificar la calidad de los resultados se comparó con otro MDE de referencia (resolución espacial 2x2 metros disponible en el Centro de Descargas de Instituto Geográfico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2023a)).

Mediante un programa en entorno R (R Core Team, 2023; RStudio Team, 2023) se obtuvo el histograma de cada MDE proveniente de datos LiDAR, así como un gráfico de tipo "scatter plot" para comparar los datos del MDE obtenido frente a un MDE de referencia. El programa se puede consultar en el anexo 7.3

4.2.1 Modelo Digital de Elevaciones Cuenca de Obejo.

El modelo digital de elevaciones obtenido a partir de datos LiDAR procesados y procesado con corrección de sumideros (L. Wang & Liu, 2006), recortado al contorno de la cuenca hidrográfica correspondiente, tiene un total de 14.887.411 píxeles y dimensiones X = 3277; Y = 4543 de una banda. Su valor mínimo es de 202,907 y su valor máximo de 773,73 m.s.n.m. Se obtiene el histograma (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que relaciona cada elevación con el número de píxeles o celdas que el corresponde, no se aprecian anomalías por lo que es un buen indicio de su validación.

Al comparar las elevaciones en MDE obtenido por LiDAR y MDE de referencia (Figura 51) apenas hay diferencias en la distribución de los datos, por lo que se valida el producto ráster de MDE.

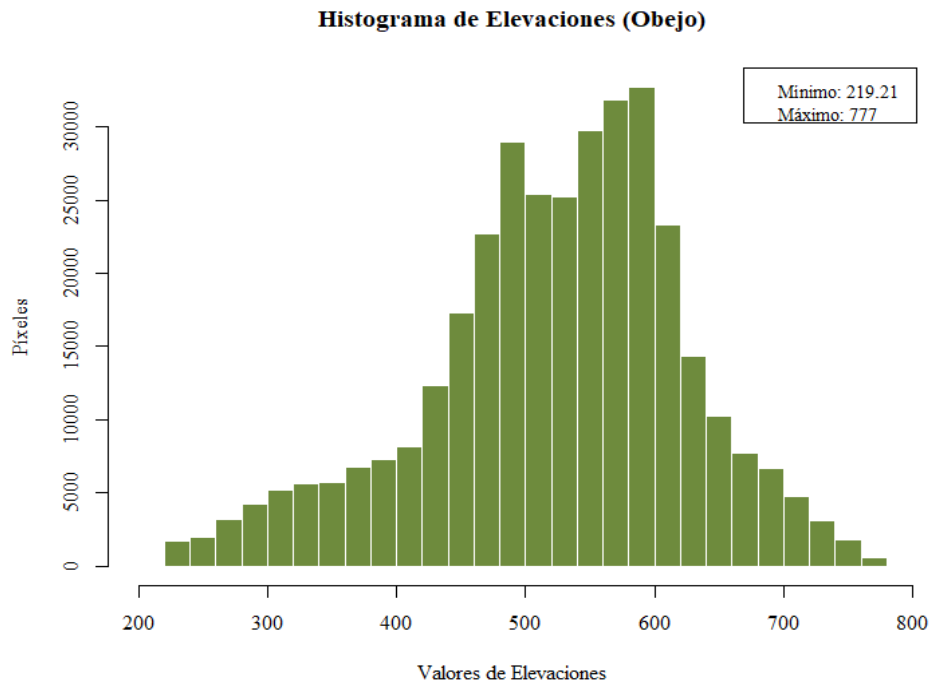


Figura 50. Histograma de elevaciones para MDE de Obejo.

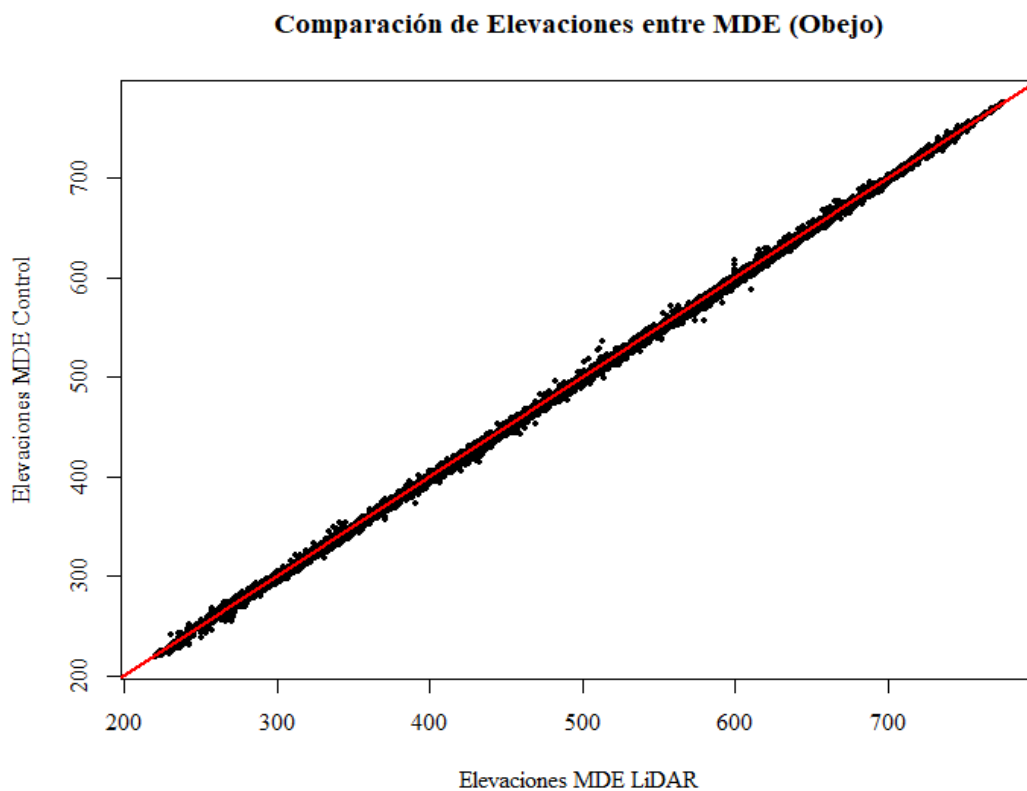


Figura 51. Gráfico de tipo "scatter plot" de la cuenca del arroyo Obejo. Comparación de MDE obtenido por datos LiDAR (eje de abscisas) frente a MDE de referencia (eje de ordenadas) obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica

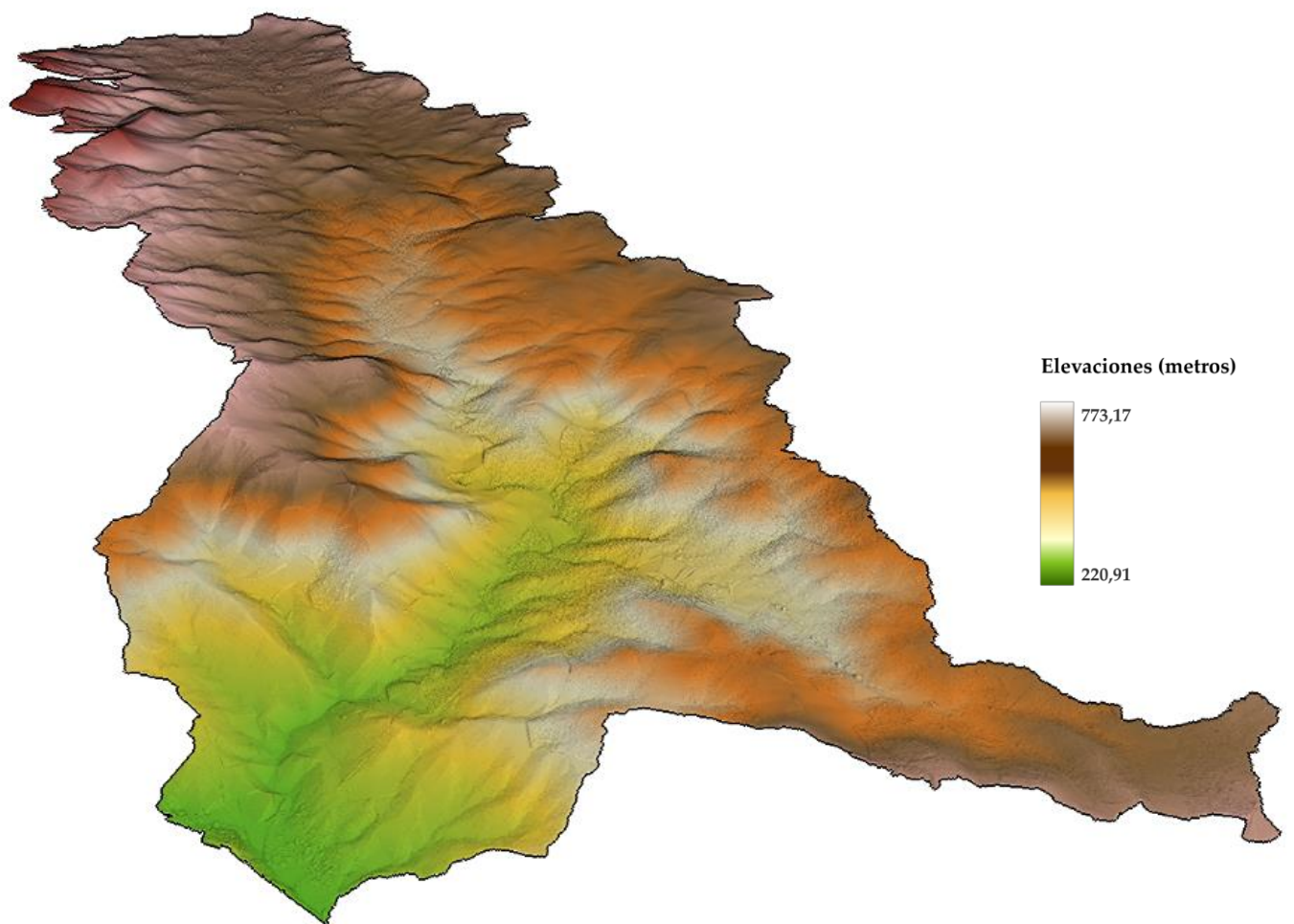


Figura 52. MDE tridimensional de la cuenca del arroyo Obejo. Colores más ocre indican mayores elevaciones, a diferencia de colores más verdes que muestran menor elevación.

4.2.2 Modelo Digital de Elevaciones. Cuenca de Peñolite.

El modelo digital de elevaciones obtenido a partir de datos LiDAR procesados y procesado con corrección de sumideros (L. Wang & Liu, 2006), recortado al contorno de la cuenca hidrográfica correspondiente, tiene un total de 7.247.796 píxeles y dimensiones $X = 3422$; $Y = 2118$ de una banda. Su valor mínimo es de 564.366 y su valor máximo de 1229.663 m.s.n.m. Se obtiene el histograma (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) que relaciona cada elevación con el número de píxeles o celdas que el corresponde, no se aprecian anomalías por lo que es un buen indicio de su validación.

Al comparar las elevaciones en MDE obtenido por LiDAR y MDE de referencia (Figura 54) apenas hay diferencias en la distribución de los datos, por lo que se valida el producto ráster de MDE.

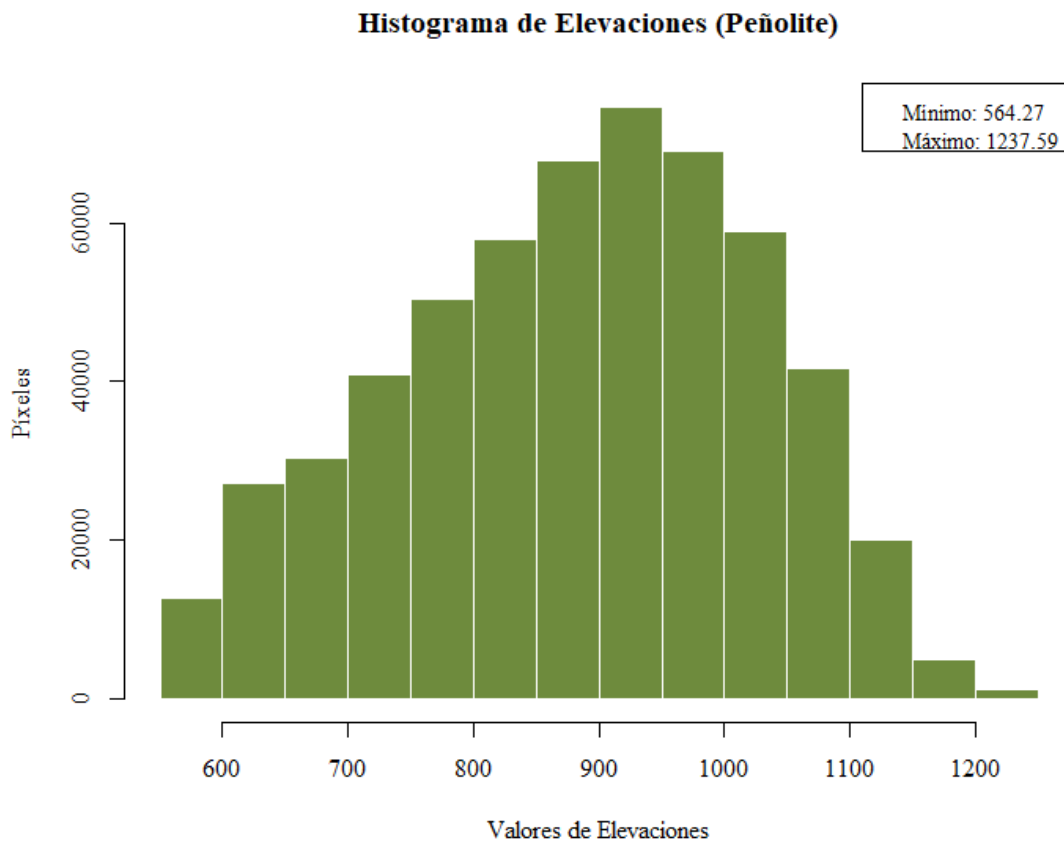


Figura 53. Histograma de elevaciones para MDE de Peñolite.

Comparación de Elevaciones entre MDE (Peñolite)

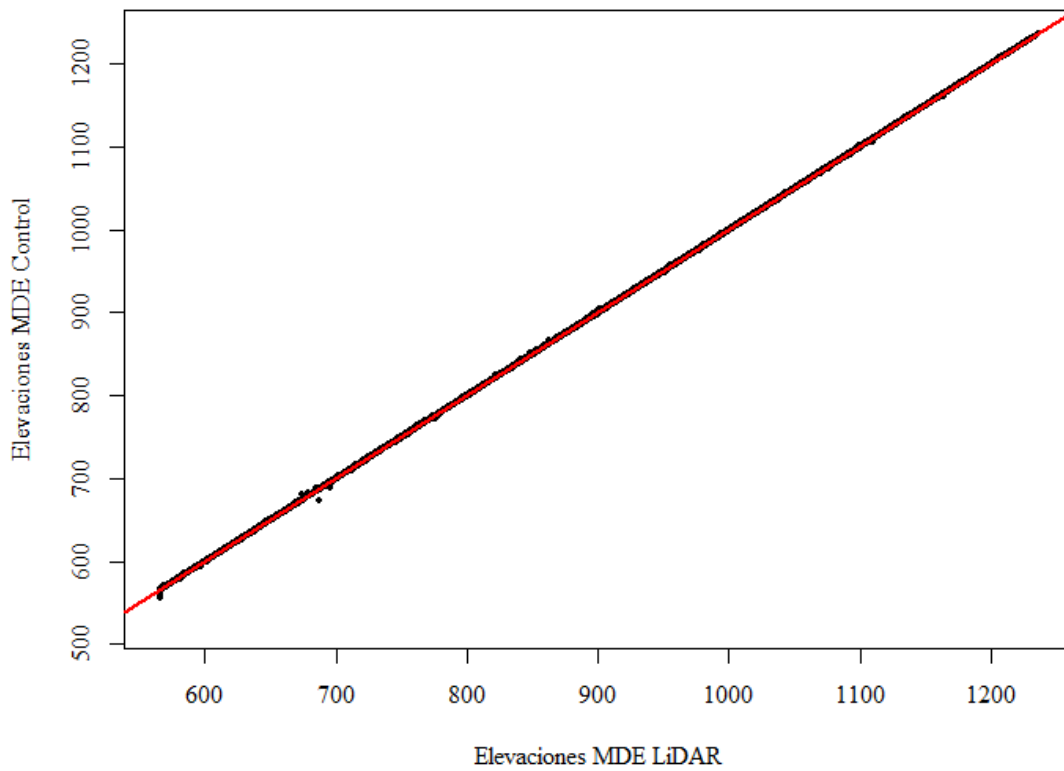


Figura 54. Gráfico de tipo "scatter plot" de la cuenca del arroyo Peñolite. Comparación de MDE obtenido por datos LiDAR (eje de abscisas) frente a MDE de referencia (eje de ordenadas) obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica.

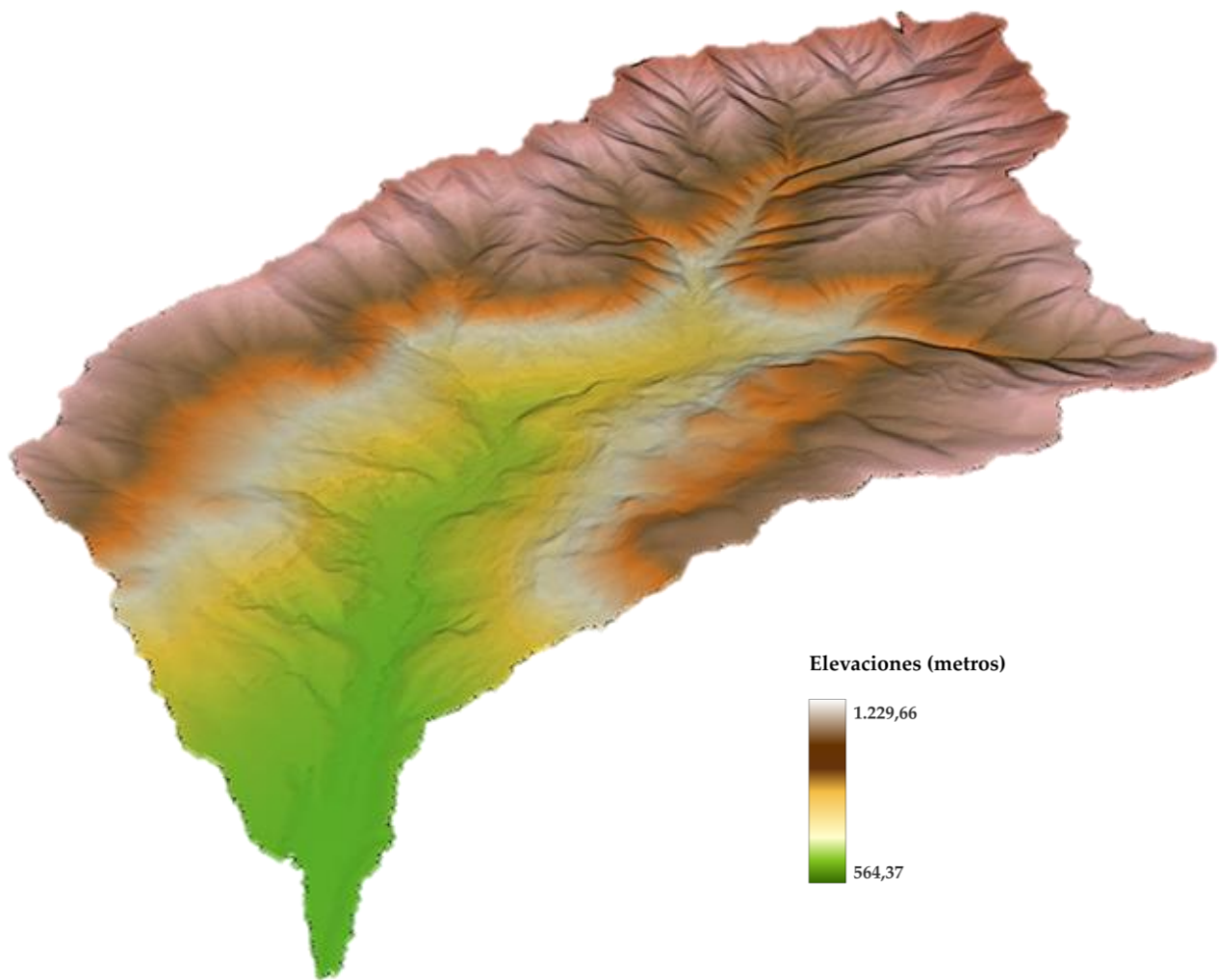


Figura 55. MDE tridimensional de la cuenca del arroyo Obejo. Colores más ocre indican mayores elevaciones, a diferencia de colores más verdes que muestran menor elevación.

4.3 Pendientes

El producto *mapa de pendientes* es obtenido a partir del MDE. Aparece descrito en la metodología (ver 3.4.1.2), y genera un ráster con extensión *GeoTIFF* con una resolución espacial de 2x2m. Los valores de pendiente aparecen en porcentaje y han sido corregidos en la metodología frente a valores superiores al 100% debido a la alta diferencia de elevaciones en un espacio longitudinal relativamente reducido.

El producto de pendientes generado a partir del MDE LiDAR de Obejo contiene áreas menos suavizadas, más en forma poligonal debido a las correcciones por zonas con pendientes anómalas, se aprecia en la Figura 56. A diferencia de la cuenca de Peñolite donde no se dieron tantas anomalías en la pendiente (ver Figura 57)

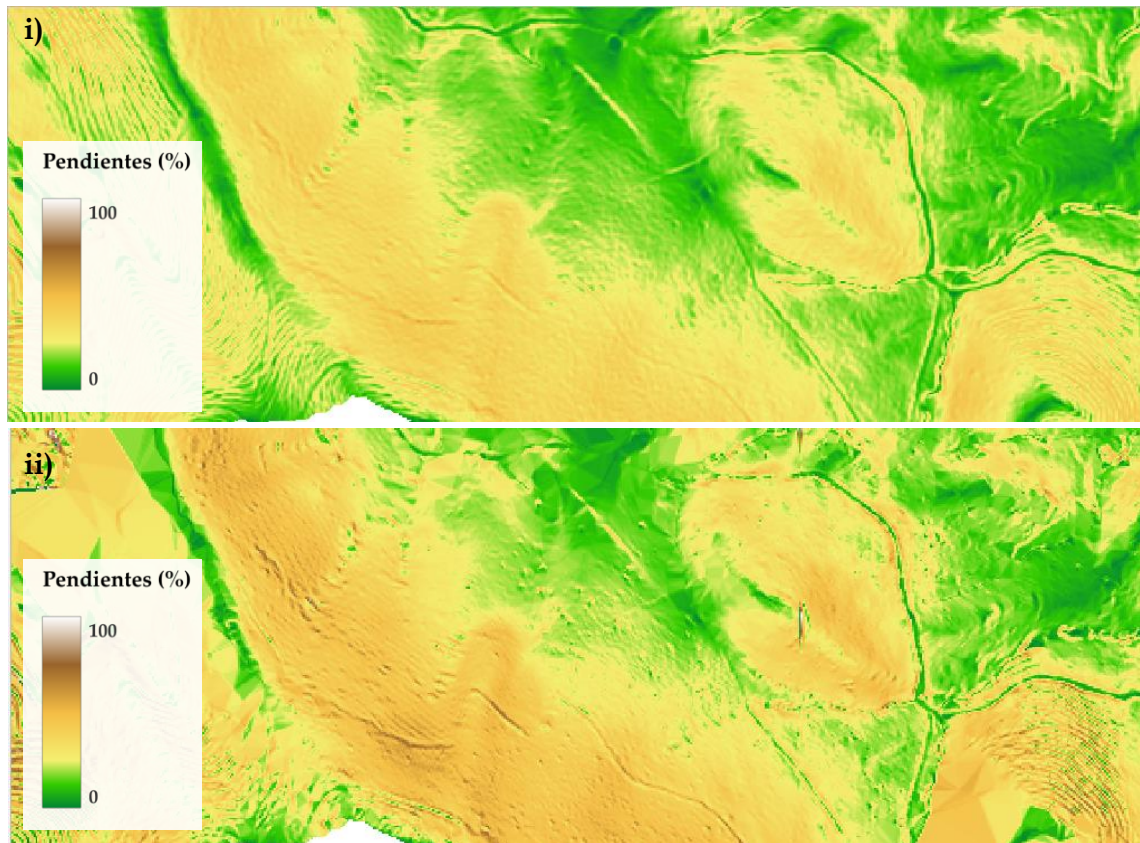


Figura 56. Comparación visual de mapas de pendientes en Obejo. i) Modelo Digital de Pendientes (PNOA); ii) Mapa de pendientes generado a partir de MDE LiDAR.

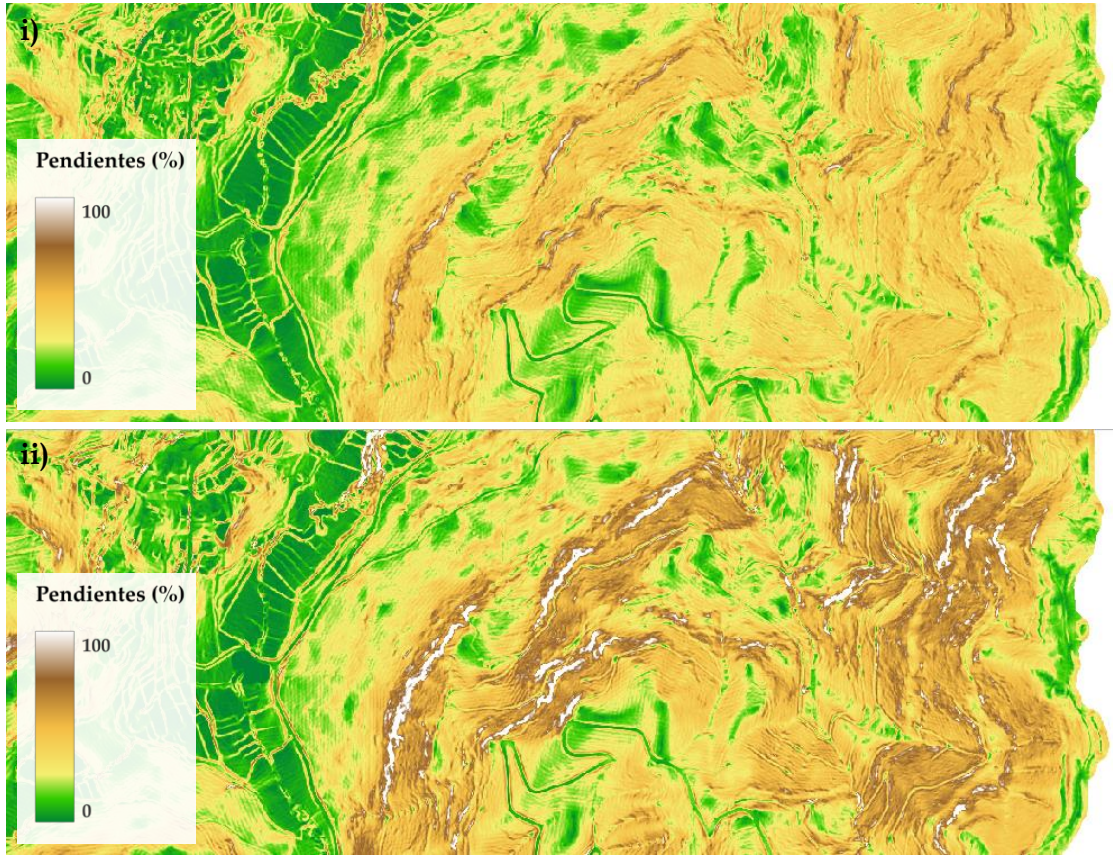


Figura 57. Comparación visual de mapas de pendientes en Peñolite. i) Modelo Digital de Pendientes (PNOA); ii) Mapa de pendientes generado a partir de MDE LiDAR.

En el caso de Obejo la media de las pendientes de 27,846% con una desviación estándar de 19,81 y una mediana de 24,028% (datos obtenidos por la herramienta *Estadísticas de zona*; QGIS).

Para la cuenca de Peñolite la media de las pendientes es de 35,812%, con una desviación estándar de 18,66 y una mediana de 33,906%. Las zonas blancas de la Figura 57 indican áreas de máxima altura corregidas de valores anómalos ya mencionados (ver página 34).

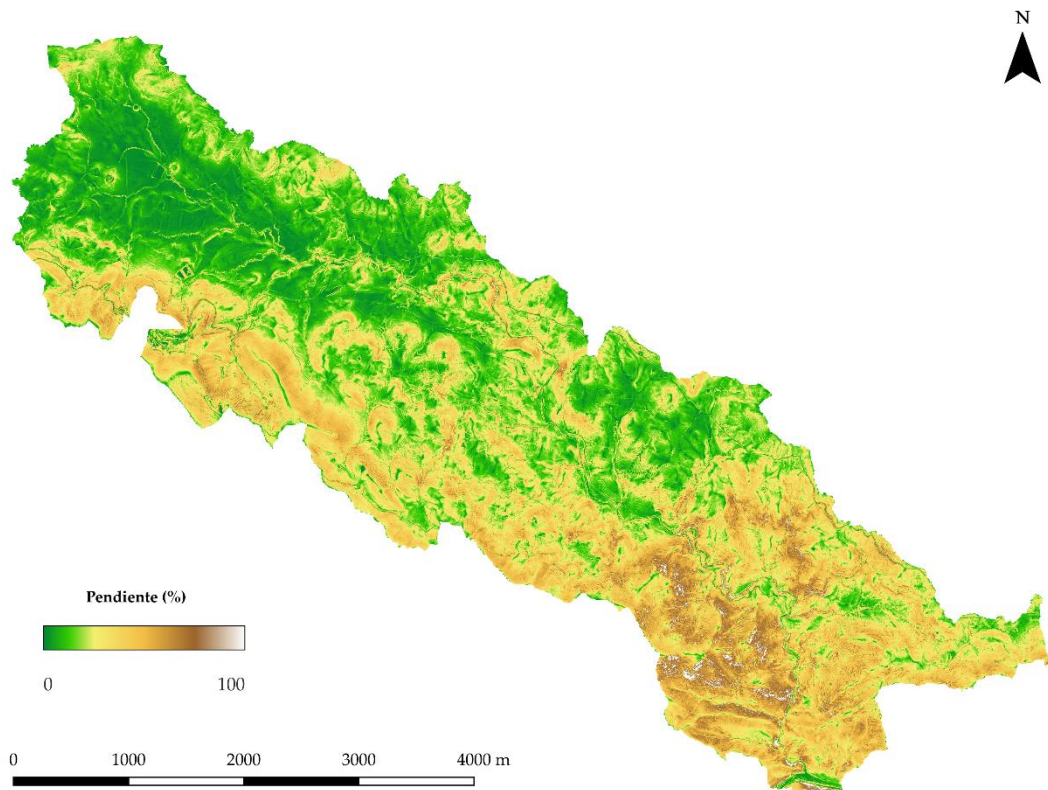


Figura 59. Mapa de pendientes, cuenca de Obejo.

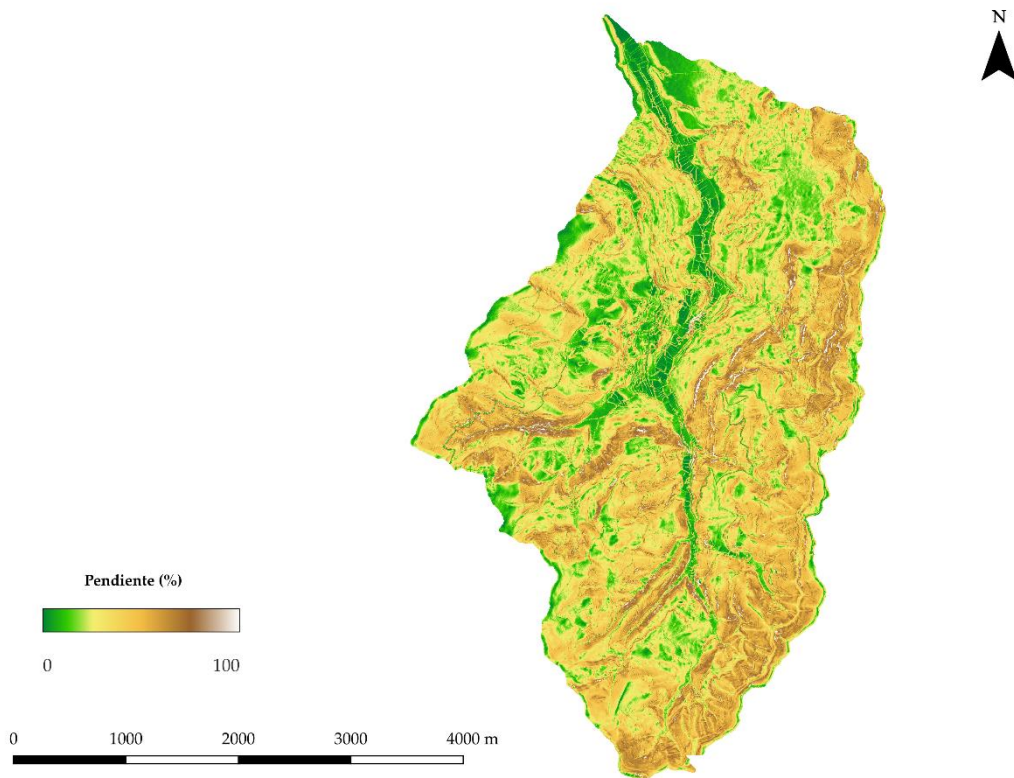


Figura 58. Mapa de pendientes, cuenca de Peñolite.

4.4 Cárcavas de la cuenca hidrográfica.

La generación automática de cárcavas por umbrales tiene sentido hidrológico, primando por encima del aspecto topográfico. La comparación y validación del trazado de cárcavas se ha aplicado tanto con fotointerpretación de ortofotografías de máxima actualidad (Instituto Geográfico Nacional, 2023b), como por visitas a campo contrastando el posicionamiento con herramientas GIS en dispositivos móviles y *Tablets* (varios dispositivos).

De esta manera se puede apreciar como algunas cárcavas siguen segmentos de vías como caminos o veredas. Ante fotointerpretación puede resultar un erro, fallo o mala calibración del algoritmo, en realidad tiene sentido hidrológico pues segmentos de caminos pueden reconducir flujos por su trazado influir en la reconducción de escorrentías (Svoray & Markovitch, 2009)

El suavizado de los bordes a escalas más reducidas es reducido y anguloso, esto se debe a la resolución espacial del MDE, pues a mayor resolución mejor definidas quedarán las cárcavas.

El trazado y dirección de flujos determinan los canales de drenaje, en este trabajo las cárcavas consideradas por la generación automática están conectadas y acaban sus flujos sobre el curso de agua principal que es el arroyo estudiado. Esta particularidad geométrica, hidrológica y topográfica es fundamental para dar sentido a la conectividad entre cárcavas y ver sus relaciones.

4.4.1 Cárcavas en la cuenca del arroyo Obejo.

La red de cárcavas considerada en Obejo tiene una longitud total de 71.540 metros en 295 elementos lineales.

Su red de cárcavas es menos densa en comparación a la red de cárcavas en la cuenca del arroyo Peñolite. Posee menos cárcavas y longitud total para una superficie superior (2067,63 ha Obejo; 1614,86 ha Peñolite). Esto puede deberse a la particularidad de la orografía donde las pendientes son más suaves en la parte norte de la cuenca.



Figura 60. Red de cárcavas obtenidas en la cuenca del arroyo Obejo.

4.4.2 Cárcavas en la cuenca del arroyo Peñolite

La red de cárcavas considerada en Peñolite tiene una longitud total de 109.755,41 metros en 610 elementos lineales.

Esta red es más densa que la obtenida en Obejo. En la cuenca de Peñolite como se aprecia en la Figura 58 la cuenca es más abundante en pendientes salvo por la zona central donde discurre el arroyo.

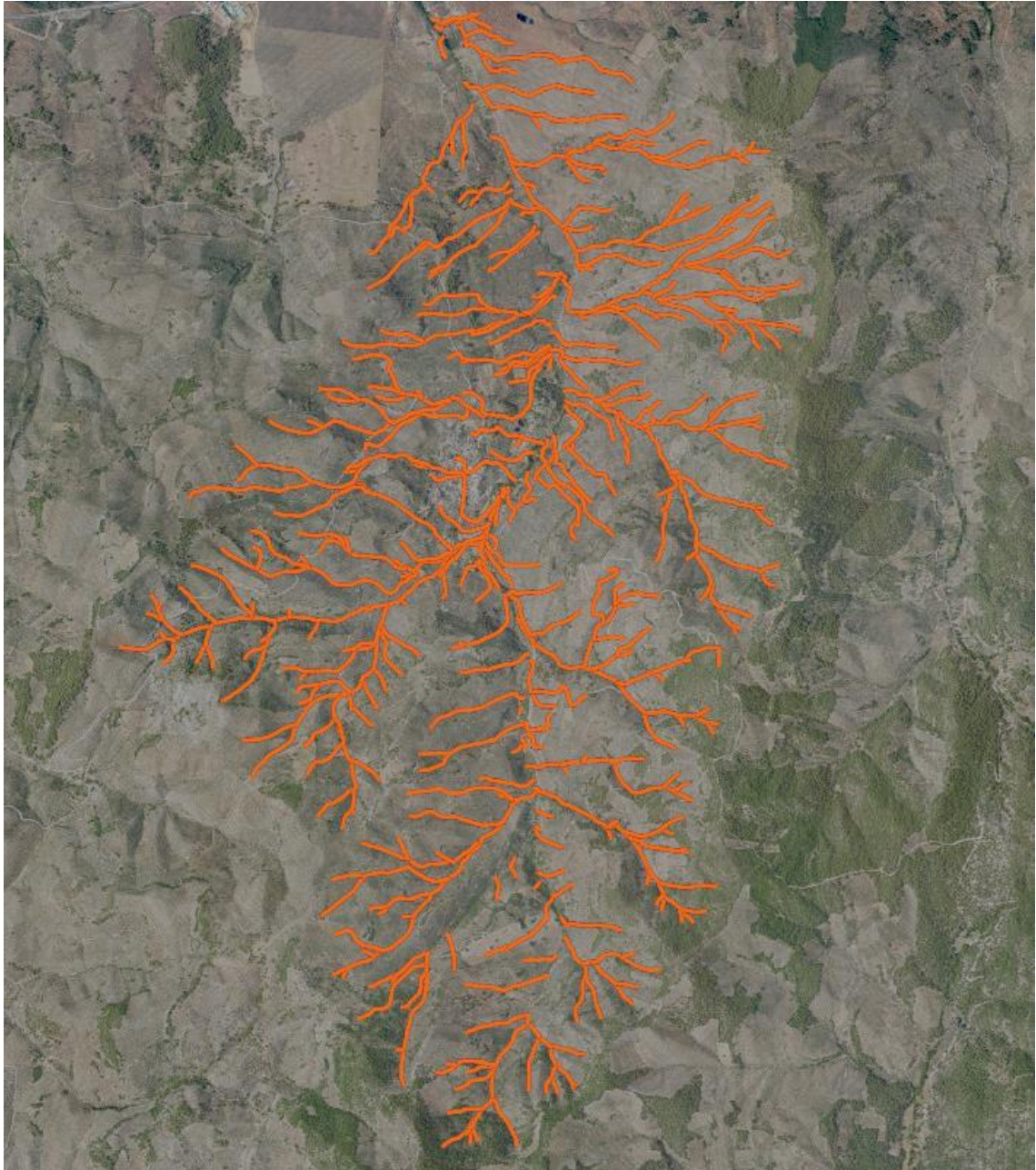


Figura 61. Red de cárcavas obtenidas en la cuenca del arroyo Peñolite.

4.5 Conectividad entre cárcavas.

Uno de los puntos más importantes es aprovechar la red de cárcavas junto a las parcelas con información de la PAC para obtener información sobre su conectividad, es decir, conocer qué cárcavas ya sea aguas arriba o aguas abajo influyen en una cárcava determinada. El formato de salida es un archivo vectorial cuyas geometrías son líneas y en sus atributos aparecen las cárcavas más cercanas aguas arriba y aguas abajo.

El sentido de la conectividad es dotar de una visión holística cómo las acciones ya sean a favor de prevenir la erosión o negligencias que la potencien no solo afectan de forma local, sino que pueden afectar a otras zonas relacionadas por esta conectividad.

4.5.1 Cuenca del arroyo Obejo.

En el caso de Obejo se obtienen un total de 1.846 subcárcavas de las que se extrae las cárcavas inmediatamente aguas arriba y la cárcava inmediatamente aguas abajo. A continuación, en la Tabla 7 se muestra un extracto de esos datos.

Tabla 7. Muestra de datos de conectividad. Cuenca de Obejo.

ID_carcava	Order	Tramos Anteriores	Tramo Posterior	ID_subcarc
97	12	[98, 103]	93	97_2
97	12	[98, 103]	93	97_3
98	1		97	98_1
103	11	[108, 111]	97	103_1
105	1		114	105_5
105	1		114	105_6
107	1		111	107_2
108	3	[117, 119]	103	108_1
111	8	[107, 116]	103	111_1
114	2	[105, 120]	116	114_1
116	7	[114, 122]	111	116_1

Los resultados muestran cómo se interconectan las cárcavas. Por ejemplo: en el caso de la cárcava 98 no tiene anteriores, su *order* es 1, por lo que en ella comienza una dirección de flujo. A su vez tiene como cárcava posterior a la identificada con el número 97. Esta última se ha formado por la unión de los flujos de las cárcavas 98 y 103, y finalmente formará la cárcava 93.

4.5.2 Cuenca del arroyo Peñolite

En el caso de Peñolite se obtienen un total de 2.291 subcárcavas de las que se extrae las cárcavas inmediatamente aguas arriba y la cárcava inmediatamente aguas abajo. A continuación, en la Tabla 8 se muestra un extracto de esos datos.

Tabla 8. Muestra de datos de conectividad. Cuenca de Peñolite.

ID_carcava	Order	Tramos Anteriores	Tramos Posterior	ID_subcarc
424	4	[421,428]	419	424_2
428	3	[431,436]	424	428_2
431	2	[434,448]	428	431_1
374	1		410	374_8
374	1		410	374_13
395	2	[403,402]	401	395_1
401	5	[395,417]	416	401_7
424	4	[421,428]	419	424_3
413	1		414	413_1
414	2	[413,423]	417	414_1
417	3	[433,414]	401	417_1

4.6 Datos asociados a las cárcavas

Los datos asociados a cárcavas/subcárcavas incorporan información adicional de valor para el establecimiento de albarradas o empalizadas en cárcavas para hacer frente a la erosión, pues caracterizan las cárcavas y facilitan el diseño de actuaciones sobre ellas.

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de los datos asociados a las cárcavas. Cuenca de Obejo.

	Media	Mediana	Moda	Desviación Típica	Mínimo	Máximo
Longitud subcárcava (m)	61.896	35.250	6	74.623	0.100	694.800
Pendiente lineal (5)	11.981	7.860	0.02	14.221	0.01	177.620
Ancho de cárcava (m)	1.024	0.800	0.800	0.348	0.800	1.700
Profundidad cárcava (m)	0.732	0.600	0.600	0.189	0.600	1.100
Número de albarradas	2.349	1	1	3.239	1	31
Número de empalizadas	2.349	1	1	3.239	1	31
Pérdida unitaria (m ³ /m)	0.830	0.500	0.500	0.5302	0.500	1.900
Longitud total (m)	1125.307	551.550	5364.900	1382.358	0.300	5364.900

Tabla 10. Estadísticos descriptivos de los datos asociados a las cárcavas. Cuenca de Peñolite

	Media	Mediana	Moda	Desviación Típica	Mínimo	Máximo
Longitud subcárcava (m)	36.169	25.500	6.100	36.610	0.100	336.300
Pendiente lineal (5)	20.107	18.582	0.001	13.132	0.000	94.891
Ancho de cárcava (m)	1.012	0.800	0.800	0.336	0.800	1.700
Profundidad cárcava (m)	0.653	0.500	0.500	0.248	0.500	1.200
Número de albarradas	8.474	4.000	1.000	11.423	1.000	111.000
Número de empalizadas	8.474	4.000	1.000	11.423	1.000	111.000
Pérdida unitaria (m ³ /m)	0.731	0.400	0.400	0.576	0.400	2.000
Longitud total (m)	143.680	80.000	478.600	224.958	0.100	1598.600

Comparando los datos de la Tabla 9 y la Tabla 10, destaca que en Obejo las cárcavas son más largas en su totalidad y como subcárcavas. Sin embargo, para las dos cuencas la variabilidad de subcárcavas y cárcavas es muy alta para ambas cuencas.

La cantidad total de albarradas necesarias puede ser indicador de la severidad de la erosión en una cuenca. Resulta que para Obejo se recomiendan 4.338 albarradas a diferencia de la cuenca de Peñolite que recomienda 19.415 albarradas. Si se divide el número total de albarradas por superficie de cuenca, se obtiene una densidad de 2 albarradas por hectárea en Obejo y 12 albarradas por hectárea en Peñolite. Esto puede deberse a la elevada pendiente de Peñolite (media de 20,107 %; mediana de 18,52%) frente a casi la mitad de pendiente lineal de las cárcavas de Obejo (Eltner et al., 2016).

La morfología comparativa de las cárcavas muestra en los estadísticos que las cárcavas en Obejo son más profundas (media de 0.732 m; mediana de 0.600 m) que las cárcavas en Peñolite (media de 0.653 m; mediana de 0,500 m). Aunque el ancho de cárcavas es muy similar, la longitud promedio de la cárcava es mayor en Obejo (1.125,307 m) que en Peñolite (143m). Esto puede indicar que, aunque las cárcavas de

Peñolite son de dimensiones menores a las de Obejo, su fuerte pendiente lineal influye en la distribución de albarradas a lo largo de cada cárcava, además de la influencia que la textura y pedregosidad del suelo pueda inducir en la resistencia del mismo a la formación de las cárcavas (Svoray & Markovitch, 2009).

El número de albarradas es orientativo y calculado por la ecuación (1), aunque en campo pueden darse condiciones no apreciables adecuadamente por los métodos SIG empleados (vegetación, morfología, construcciones, escombros, etc.).

4.7 Retención de sedimentos.

Debido a dificultades por conexión GNSS no se pudo realizar un vuelo correcto en la cuenca del arroyo de Peñolite, por lo que los resultados mostrados corresponden a la cuenca del arroyo Obejo.

A continuación, se presenta cada albarrada sobre un mapa que representa la pérdida/retención de sedimentos. Colores cercanos al rojo indican mayor pérdida de suelo por diferencia de elevaciones, en cambio colores más próximos al azul indican retención de suelo. Se acompaña de un perfil de elevaciones relativo a pérdidas/ganancias de suelo en zonas próximas a las albarradas. En todas las albarradas se aprecia la retención de sedimentos en un rango entre los 0.28 y 0.45 m de altura de sedimentos retenidos. Por lo que el diseño obtenido a través de la identificación de cárcavas y distribución de albarradas cumplió su función relativa a la retención de sedimentos e incluso elementos contaminantes.

Se acompaña a cada mapa de diferencias de elevaciones con una representación tridimensional de cada cárcava antes y después de la instalación de albarradas. En cada imagen se puede observar cómo se ha elevado el fondo de la cárcava y apreciarse el punto exacto donde está situada la albarrada. Los resultados confirman la utilidad de las albarradas propuestas para retener sedimentos y, en definitiva, estabilizar la cárcava para evitar su crecimiento, posibilitando además el paso de maquinaria de un lado a otro de la misma.

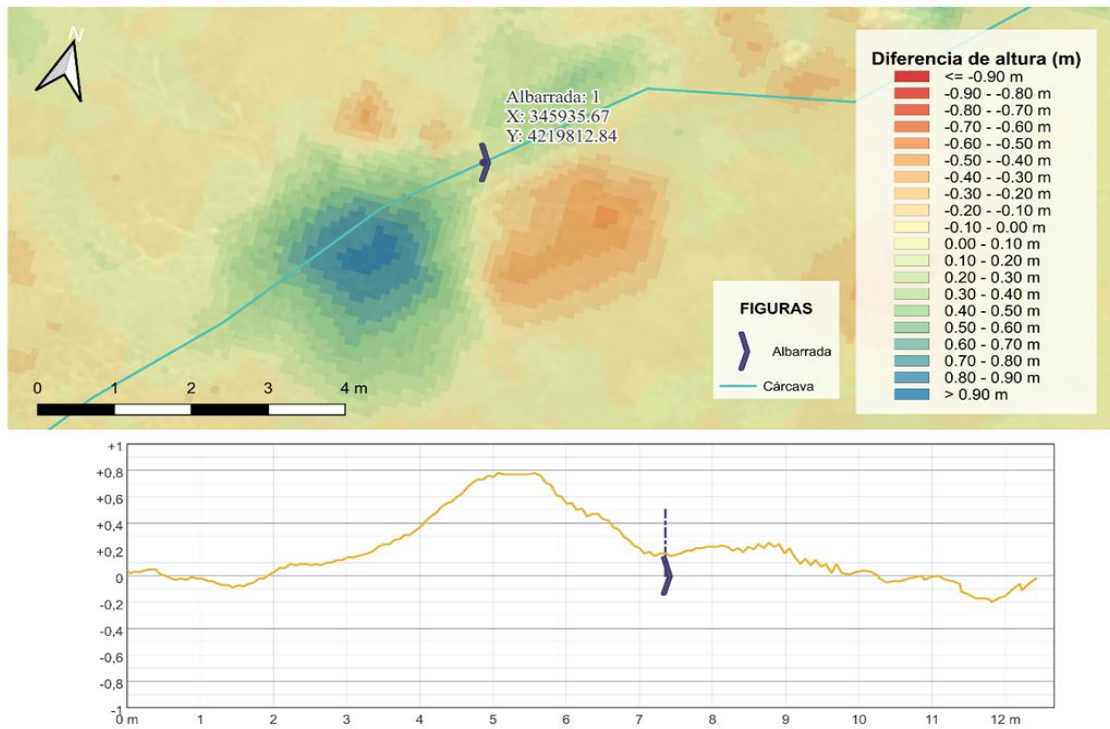


Figura 62. Retención de suelo en albarrada 1.

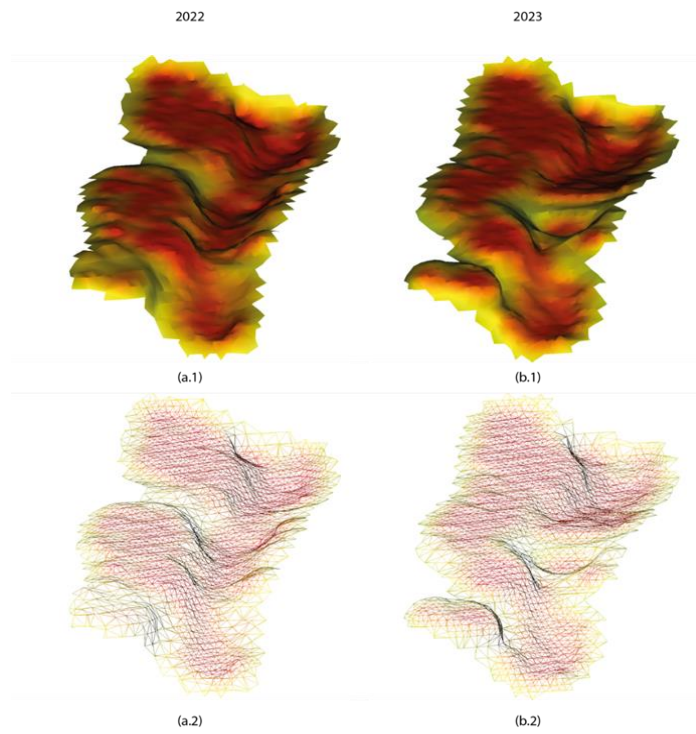


Figura 63. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 1.

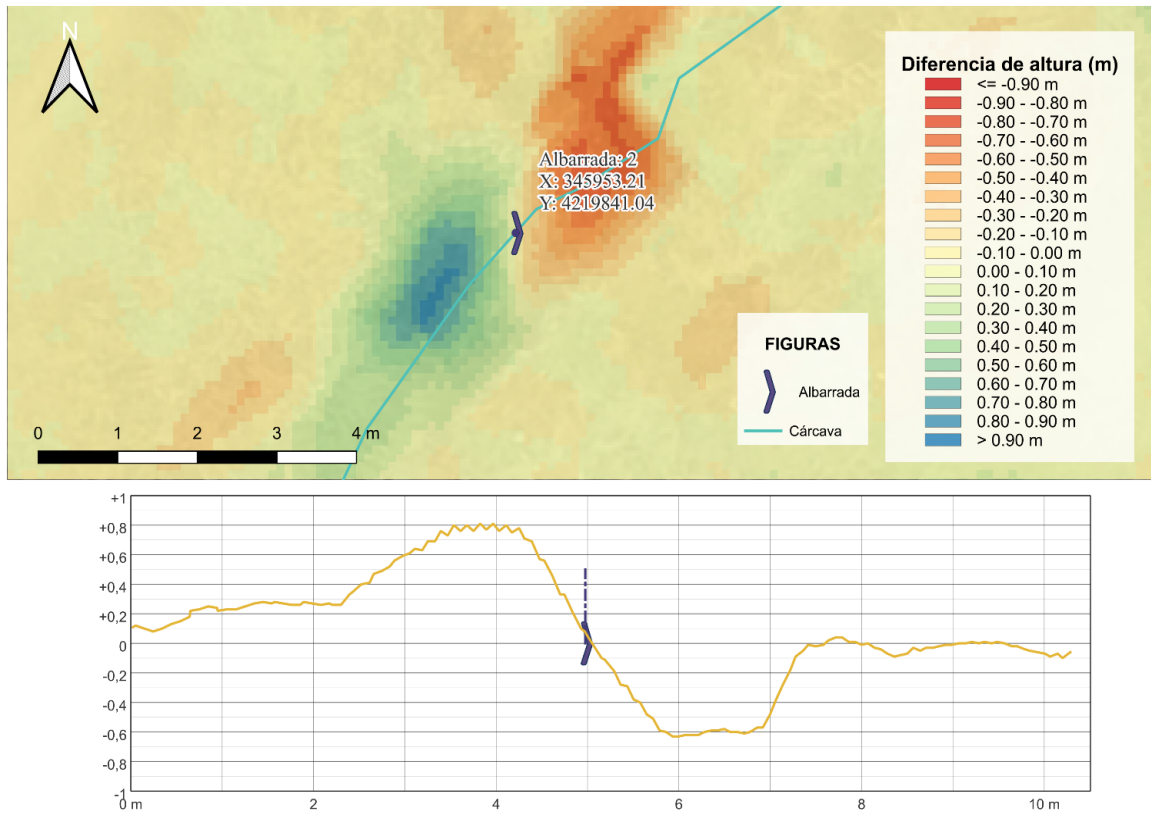


Figura 64 . Retención de suelo en albarrada 2

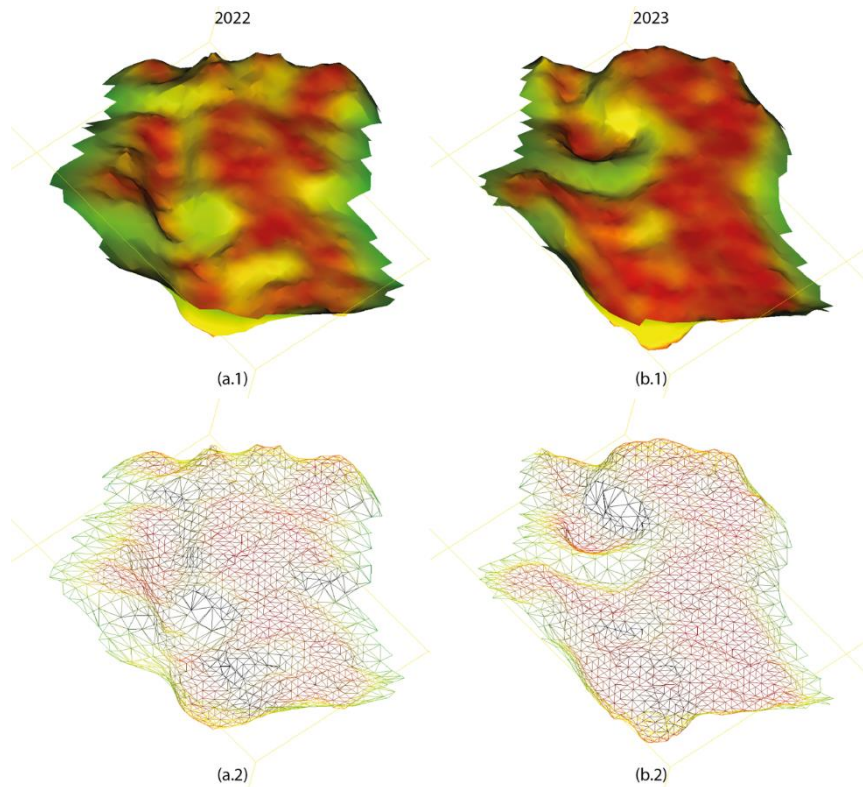


Figura 65. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 2.

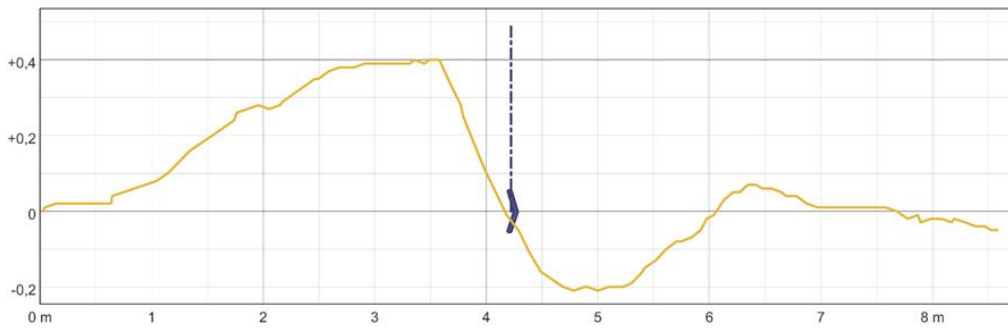
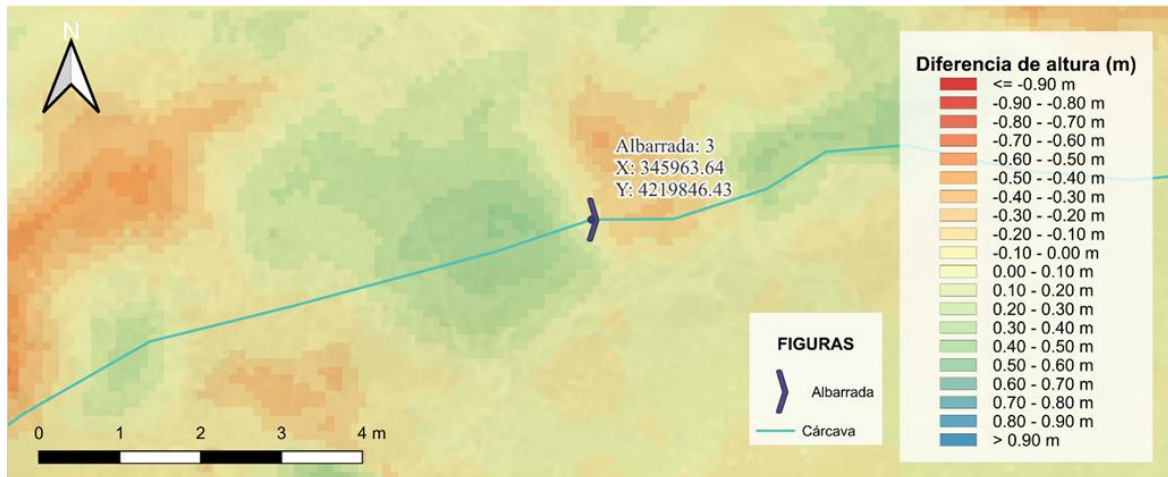


Figura 67. Retención de suelo en albarrada 3.

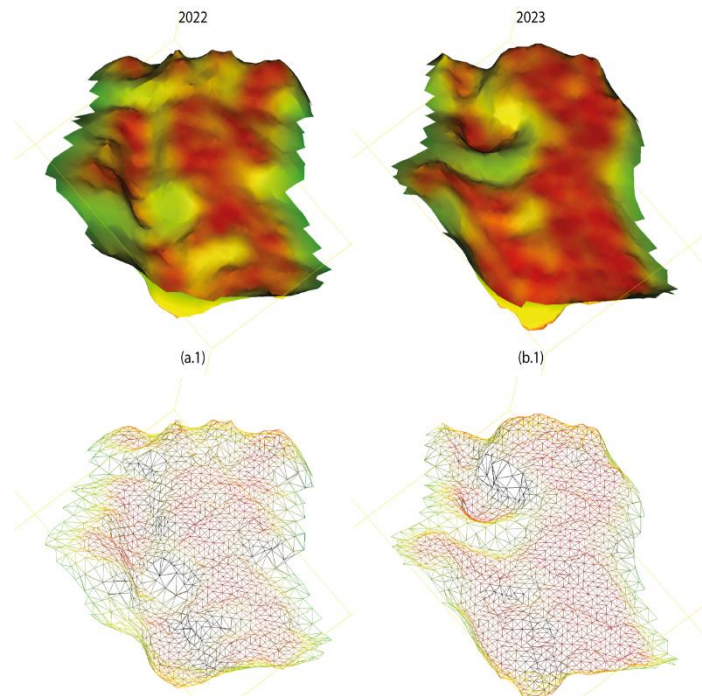


Figura 66. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 3.

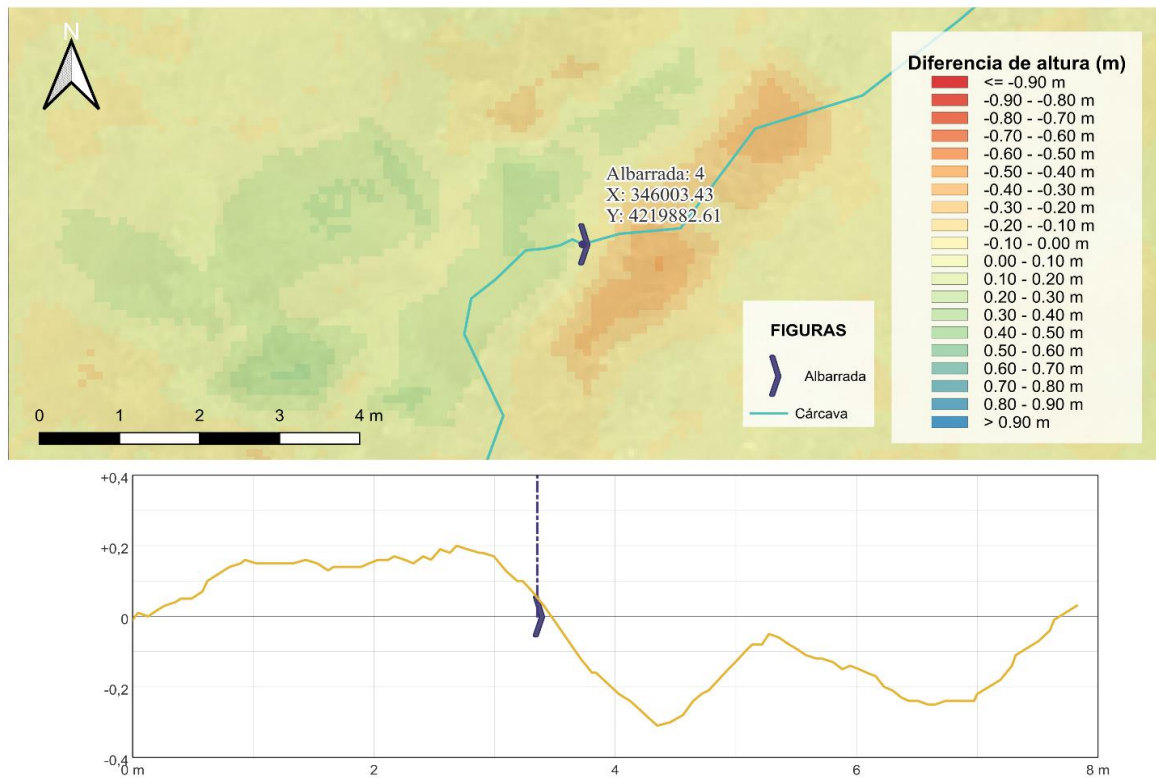


Figura 68. Retención de suelo albarrada 4.

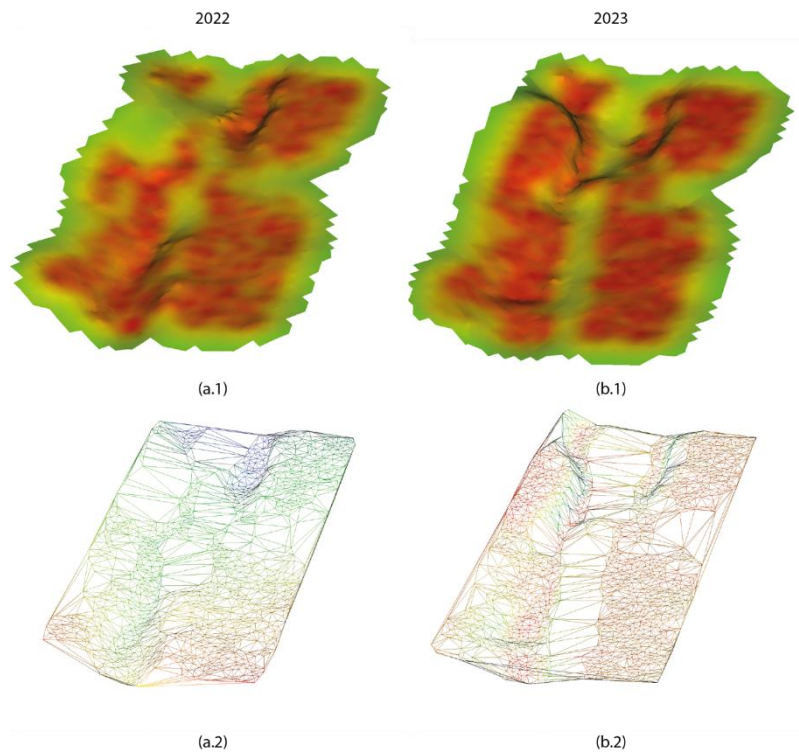


Figura 69. Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 4.

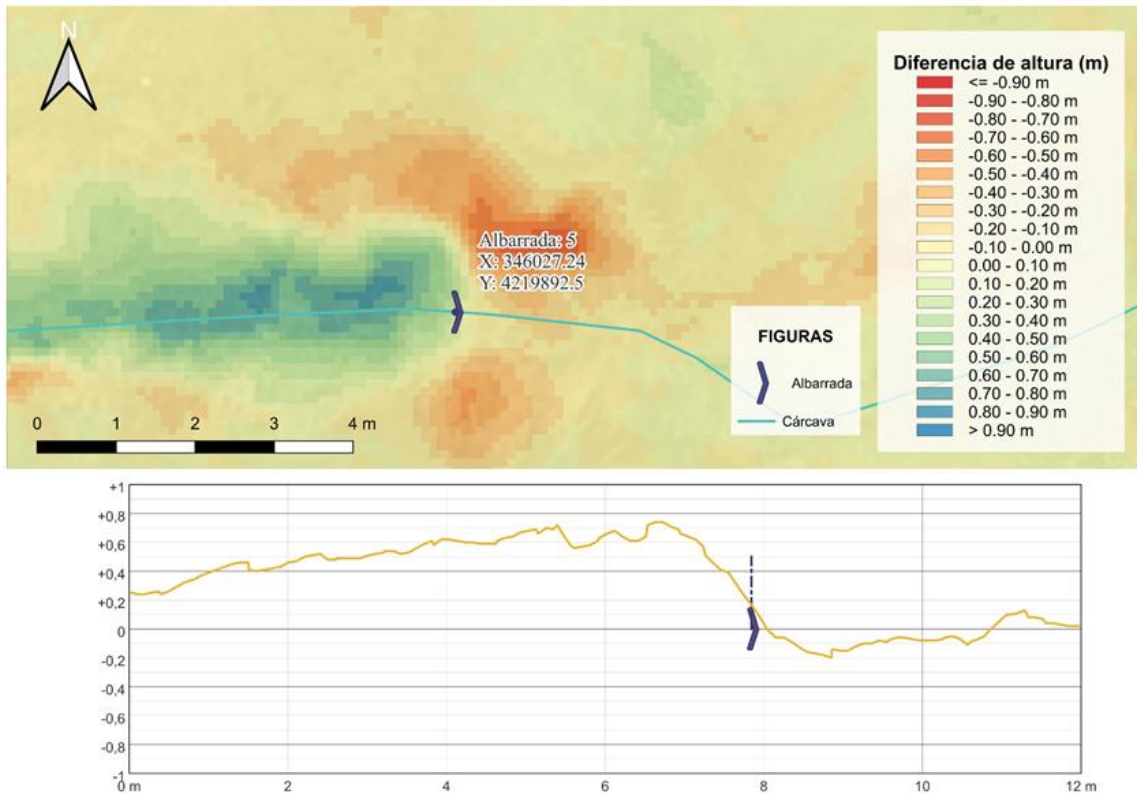


Figura 71. Retención de suelo por albarrada 5.

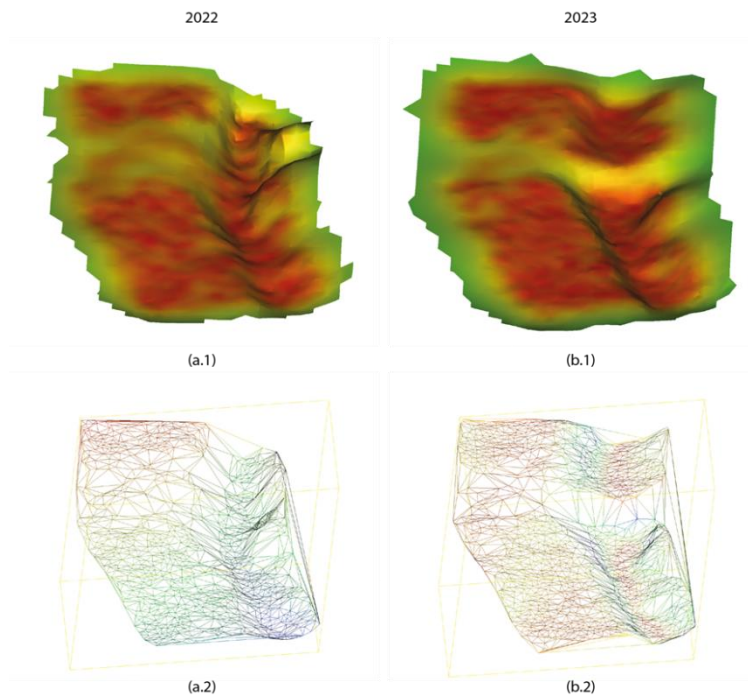


Figura 70. . Comparativa vistas tridimensionales de los años (a) 2022 y (b) 2023, consideramos una vista (1) mesh y (2) wireframe para la albarrada 5.

5 CONCLUSIONES

En este estudio, se aplica la tecnología LiDAR en combinación a Sistemas de Información Geográfica para obtener la red de cárcavas de dos cuencas diferentes donde se da el olivar tradicional de alta pendiente. A partir de los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

- El modelo automático de evolución espaciotemporal de las redes de cárcavas, basado en algoritmo de dirección de flujo D8 y en el área de captación a partir de un punto de salida de flujos, se ha aplicado con éxito a las dos cuencas experimentales.
- Los Modelos Digitales de Elevaciones obtenidos a partir de datos LiDAR fueron válidos para su uso por el modelo automático de obtención de cárcavas.
- La conectividad entre cárcavas y su relación con parcelas posibilita el estudio de problemas y soluciones en las cuencas estudiadas a través de un enfoque holístico.
- La generación de datos asociados a las cárcavas facilitó la caracterización y análisis particular de cárcavas en cada cuenca.
- Los sensores LiDAR y RGB favorecieron una monitorización más precisa de la evolución de las cárcavas y la acumulación de sedimentos, confirmando la bondad de las medidas de corrección propuestas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- AGAPA. (2022). *Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía*.
<https://www.juntadeandalucia.es/agenciaagrariaypesquera/portal/>
- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape* (2.0.0).
- American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. (2019, marzo 26). *LAS Specification v.14 - R14*. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/03/LAS_1_4_r14.pdf
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1993). *Channel network hydrology* (Kirkby, Ed.; pp. 29-33). John Wiley and Sons.
- Cerdà, A., Keesstra, S., Pulido, M., Jordán, A., Novara, A., Giménez-Morera, A., Lucas-Borja, M. E., Martínez-Murillo, J., Rodrigo-Comino, J., Pereira, P., Nadal-Romero, E., Taguas, T., Ubeda, X., Brevik, E., Tarolli, P., Bagarello, V., Parras-Alcántara, L., Muñoz-Rojas, M., Oliva, M., & Di Prima, S. (2017). *Soil erosion and degradation in Mediterranean Type Ecosystems. The Soil Erosion and Degradation Research Group (SEDER) approach and findings*.
- CloudCompare 2.12.4. (2023).
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- David, M., & Brenes, G. (2006). Reestructuración, explotaciones unifamiliares y el cultivo del olivar en Andalucía. *Economía Sociedad y Territorio*, VI(21), 119-150.
<https://doi.org/10.22136/EST002006275>
- Dirección General de Ayudas Directas y de Mercados. Consejería de Agricultura, P. A. y D. Rural. J. de A. (2023). *Recintos SIGPAC 2023*.
<https://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturapescaaguaydesarrollo-rural/servicios/sigpac/visor/paginas/sigpac-descarga-informacion-geografica-shapes-provincias.html>
- Dirección General del Catastro. (2023). *Sede Electrónica del Catastro*.
<https://www.sedecatastro.gob.es>

- Dwarakish, G. S., & Ganasri, B. P. (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>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellán, A. (2016). Image-based surface reconstruction in geomorphometry - merits, limits and developments. *EARTH SURFACE DYNAMICS*, 4(2), 359-389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Espejo-Pérez, A. J., Rodríguez-Lizana, A., Ordóñez, R., & Giráldez, J. V. (2013). Soil Loss and Runoff Reduction in Olive-Tree Dry-Farming with Cover Crops. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 2140-2148. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2013.06.0250>
- Gómez, J. A., Castillo, C., Mora, J., Lora, A., Taguas, E. V, Ayuso, J. L., Guerrero-Casado, J., & Tortosa, F. S. (2019). *Criterios técnicos para el diseño y evaluación de cárcavas, revegetación para diversificación del paisaje, muros de contención, mejora ambiental de fuentes y abrevaderos y construcción de charcas artificiales* (Junta de Andalucía & G. P. y D. S. . Consejería de Agricultura, Eds.). Secretaría General Técnica. Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Gómez, J. A., Llewellyn, C., Basch, G., Sutton, P. B., Dyson, J. S., & Jones, C. A. (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 and Management*, 27(4), 502-514. <https://doi.org/10.1111/J.1475-2743.2011.00367.X>
- GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)* (8.3. Open Source). <https://grass.osgeo.org/>
- Guzmán-Álvarez, J. R., Gómez, J. A., & Rallo, L. (2009). *Sostenibilidad de la producción de olivar en Andalucía* (Consejería de Agricultura y Pesca, Ed.; 1.ª ed.).
- Instituto Geográfico Nacional. (2023a). *Centro Nacional de Información Geográfica*. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>
- Instituto Geográfico Nacional. (2023b). *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)*. <https://pnoa.ign.es>

- Kwast, H. van der, Menke, K., & Sherman, G. E. (2020). *QGIS for Hydrological Applications: recipes for catchment hydrology and water management* (1.ª ed.). Locate Press LLC.
- Lima Cueto, F. J., Blanco Sepúlveda, R., Gómez Moreno, M. L., & Garlacho Jiménez, F. B. (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 R. Romojaro (Ed.), *Las humanidades en el mundo digital / El mundo digital en las humanidades* (1.ª ed.). Tirant Humanidades.
- MAPA. (2023, junio). *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, producción agrícola de aceite de oliva*.
- Mazzoleni, M., Paron, P., Reali, A., Juizo, D., Manane, J., & Brandimarte, L. (2020). Testing UAV-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment. *Natural Hazards*, 103(1), 139-163. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03963-4>
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2023). *ENAIRES*. <https://drones.enaire.es/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Red Hidrográfica*. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/red-hidrografica.html>
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323-344. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Pareja Funes, J. M., López Uceda, A., Hayas López, A., Lobo Sánchez, Á., Pérez Galvín, A., Terdío Cerrilo, G., Guillen Climent, M., Jiménez Romero, J. R., Algeet Abarquero, N., Garrido Díaz, L., & Peña Acevedo, A. (2021). *Elemento Modular Apilable de Construcción de Diques* (Patent ES2885772 A1). Oficina Española de Patentes y Marcas.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, 50(2-4), 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)

- Poesen, J., Vanderkerckhove, L., Nachtergaele, J., Oostwoud Wijdenes, D., Verstraeten, G., & Wesemael, B. (2002). Gully Erosion in Dryland Environments. Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid. En *Channels*.
- PostGIS Project Steering Committee. (2023). *PostGIS, spatial and geographic objects for postgresQL*.
- QGIS.org. (2023). *QGIS Geographic Information System*. <http://www.qgis.org/>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (4.3.2). <https://www.R-project.org/>
- RStudio Team. (2023). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. <http://www.rstudio.com/>
- SIGPAC. (2022). *Sistema de Información Geográfico de Parcelas Agrícolas*. <https://sigpac.mapa.gob.es/fega/visor/>
- Singh, V. P. (1997). Computer models of watershed hydrology. En M. Sivapalan (Ed.), *CATENA* (Vol. 29, Número 1). Water Resources Publications. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00060-4)
- Smith, L. M. (1993). *Investigation of Ephemeral Gullies in Loessial Soils in Mississippi*.
- Svoray, T., & Markovitch, H. (2009). Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(14), 1970-1984. <https://doi.org/10.1002/esp.1873>
- Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA*, 63(2-3), 132-153. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2005.06.001>
- Vanwallegem, T., & Giráldez, J. V. (2008). Midiendo fuera de las parcelas de erosión: importancia de erosión por cárcavas y regueros en cuencas de olivar. *VII Simposio del Agua en Andalucía*, 211-217.
- Vieux, B. E. (2016). *Water Science and Technology Library Distributed Hydrologic Modeling Using GIS Third Edition* (V. P. Singh, Ed.; 3.^a ed., Vol. 74). Water Science and Technology Library, Springer. <http://www.springer.com/series/6689>
- Villanueva, J. R. E., Martínez, L. I., & Montiel, J. I. P. (2019). DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and LiDAR-Derived Ground Control Points for Flood

Estimations. *Sensors* 2019, Vol. 19, Page 3205, 19(14), 3205.
<https://doi.org/10.3390/S19143205>

Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213.
<https://doi.org/10.1080/13658810500433453>

Wang, Q., Liu, J., Wu, L., Xu, Z., & Fan Songtao and Qian, A. (2016). ANALYSIS OF GULLY EROSION HAZARD USING HIGH RESOLUTION TERRESTRIAL LIDAR. 2016 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 7469-7472.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730948>

7 ANEXOS

7.1 ANEXO 1: Metadatos LiDAR, cuenca Obejo.

```
version major.minor:      1.2
system identifier:        'PDAL'
generating software:      'PDAL 2.1.0 (828987) '
file creation day/year:   261/2024
header size:              227
offset to point data:     748
number var. length records: 4
point data format:        3
point data record length: 42
number of point records:  182290703
number of points by return: 147841009 31354962 2988061 105011
1648
scale factor x y z:       0.001 0.001 0.001
offset x y z:             340000 4220000 0
min x y z:                340000.010 4214000.010 199.660
max x y z:                349999.990 4223999.990 806.880
WARNING: stored resolution of min_z not compatible with z_offset
and z_scale_factor: 199.66000366210937
WARNING: stored resolution of max_x not compatible with x_offset
and x_scale_factor: 349999.99046875001
WARNING: stored resolution of max_y not compatible with y_offset
and y_scale_factor: 4223999.9899804685
WARNING: stored resolution of max_z not compatible with z_offset
and z_scale_factor: 806.8800048828125
variable length header record 1 of 4:
reserved                  0
user ID                   'LASF_Spec'
record ID                 4
length after header       192
description                'Extra Bytes Record'
```

```

    Extra Byte Descriptions
      data type: 10 (double), name "Original__cloud__index",
description: "", scale: 1 (not set), offset: 0 (not set)
variable length header record 2 of 4:
  reserved          0
  user ID           'LASF_Projection'
  record ID         34735
  length after header 80
  description       'GeoTiff GeoKeyDirectoryTag'
    GeoKeyDirectoryTag version 1.1.0 number of keys 9
      key 1024 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 2 -
GTMModelTypeGeoKey: ModelTypeGeographic
      key 1025 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 1 -
GTRasterTypeGeoKey: RasterPixelIsArea
      key 2048 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 4258 -
GeographicTypeGeoKey: look-up for 4258 not implemented
      key 2049 tiff_tag_location 34737 count 8 value_offset 0 -
GeogCitationGeoKey: unknown
      key 2054 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 9102 -
GeogAngularUnitsGeoKey: Angular_Degree
      key 2057 tiff_tag_location 34736 count 1 value_offset 1 -
GeogSemiMajorAxisGeoKey: 6378137
      key 2059 tiff_tag_location 34736 count 1 value_offset 0 -
GeogInvFlatteningGeoKey: 298.2572221
      key 4097 tiff_tag_location 34737 count 8 value_offset 8 -
VerticalCitationGeoKey: unknown
      key 4099 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 9001 -
VerticalUnitsGeoKey: Linear_Meter
variable length header record 3 of 4:
  reserved          0
  user ID           'LASF_Projection'
  record ID         34736
  length after header 16
  description       'GeoTiff GeoDoubleParamsTag'
    GeoDoubleParamsTag (number of doubles 2)
      298.257 6.37814e+006
variable length header record 4 of 4:
  reserved          0
  user ID           'LASF_Projection'
  record ID         34737
  length after header 17
  description       'GeoTiff GeoAsciiParamsTag'
    GeoAsciiParamsTag (number of characters 17)
      unknown|unknown|
reporting minimum and maximum for all LAS point record entries ...
X              10      9999990
Y             -5999990   3999990
Z              199660    806880
intensity      19048     65535
return_number   1         6
number_of_returns 1         6
edge_of_flight_line 0         1
scan_direction_flag 0         0
classification  1         17
scan_angle_rank -27        26
user_data       0         0
point_source_ID 54         70
gps_time 285403215.701870 285508294.055386

```

```

WARNING: range violates GPS week time specified by global encoding
bit 0
  Color R 4096 65280
        G 6656 65280
        B 8448 65280
  attribute0          0          0 ('Original__cloud__index')
WARNING: there is coordinate resolution fluff (x10) in XYZ
number of first returns:          147841009
number of intermediate returns: 3094899
number of last returns:           147837223
number of single returns:         116482428
WARNING: there are 12 points with return number 6
overview over number of returns of given pulse: 116482428 56736707
8649893 413426 8177 72 0
histogram of classification of points:
  1119596 unclassified (1)
  69311872 ground (2)
  12653995 low vegetation (3)
  12798572 medium vegetation (4)
  20923286 high vegetation (5)
  102615 building (6)
  4564 noise (7)
  39194 water (9)
  65335386 overlap (12)
  1623 bridge deck (17)
classification histogram with bin size 1.000000
  bin 1 has 1119596
  bin 2 has 69311872
  bin 3 has 12653995
  bin 4 has 12798572
  bin 5 has 20923286
  bin 6 has 102615
  bin 7 has 4564
  bin 9 has 39194
  bin 12 has 65335386
  bin 17 has 1623
  average classification 6.136180461161533 for 182290703 element(s)

```

7.2 ANEXO 2: Metadatos de LiDAR, cuenca Peñolite.

```

global_encoding:          0
project ID GUID data 1-4: 00000000-0000-0000-0000-000000000000
version major.minor:     1.2
system identifier:       'PDAL'
generating software:     'PDAL 2.1.0 (828987)'
file creation day/year:  261/2024
header size:             227
offset to point data:    748
number var. length records: 4
point data format:       3
point data record length: 42
number of point records: 127761822
number of points by return: 105862424 20435033 1446073 18221 71
scale factor x y z:      0.001 0.001 0.001

```

```

offset x y z:                514000 4240000 0
min x y z:                   514000.000 4236000.000 524.711
max x y z:                    519999.990 4245999.990 1249.059
WARNING: stored resolution of min_z not compatible with z_offset
and z_scale_factor: 524.71099853515625
WARNING: stored resolution of max_x not compatible with x_offset
and x_scale_factor: 519999.990234375
WARNING: stored resolution of max_y not compatible with y_offset
and y_scale_factor: 4245999.990234375
WARNING: stored resolution of max_z not compatible with z_offset
and z_scale_factor: 1249.0589599609375
variable length header record 1 of 4:
  reserved                    0
  user ID                     'LASF_Spec'
  record ID                   4
  length after header         192
  description                  'Extra Bytes Record'
  Extra Byte Descriptions
    data type: 10 (double), name "Original_cloud_index",
description: "", scale: 1 (not set), offset: 0 (not set)
variable length header record 2 of 4:
  reserved                    0
  user ID                     'LASF_Projection'
  record ID                   34735
  length after header         80
  description                  'GeoTiff GeoKeyDirectoryTag'
  GeoKeyDirectoryTag version 1.1.0 number of keys 9
    key 1024 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 2 -
GTModelTypeGeoKey: ModelTypeGeographic
    key 1025 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 1 -
GTRasterTypeGeoKey: RasterPixelIsArea
    key 2048 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 4258 -
GeographicTypeGeoKey: look-up for 4258 not implemented
    key 2049 tiff_tag_location 34737 count 8 value_offset 0 -
GeogCitationGeoKey: unknown
    key 2054 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 9102 -
GeogAngularUnitsGeoKey: Angular_Degree
    key 2057 tiff_tag_location 34736 count 1 value_offset 1 -
GeogSemiMajorAxisGeoKey: 6378137
    key 2059 tiff_tag_location 34736 count 1 value_offset 0 -
GeogInvFlatteningGeoKey: 298.2572221
    key 4097 tiff_tag_location 34737 count 8 value_offset 8 -
VerticalCitationGeoKey: unknown
    key 4099 tiff_tag_location 0 count 1 value_offset 9001 -
VerticalUnitsGeoKey: Linear_Meter
variable length header record 3 of 4:
  reserved                    0
  user ID                     'LASF_Projection'
  record ID                   34736
  length after header         16
  description                  'GeoTiff GeoDoubleParamsTag'
  GeoDoubleParamsTag (number of doubles 2)
    298.257 6.37814e+006
variable length header record 4 of 4:
  reserved                    0
  user ID                     'LASF_Projection'
  record ID                   34737
  length after header         17

```

```

description          'GeoTiff GeoAsciiParamsTag'
  GeoAsciiParamsTag (number of characters 17)
  unknown|unknown|
reporting minimum and maximum for all LAS point record entries ...
X                   0      5999990
Y                  -4000000    5999990
Z                   524711    1249059
intensity           1         4095
return_number       1         5
number_of_returns   1         5
edge_of_flight_line 0         1
scan_direction_flag 0         1
classification       1        12
scan_angle_rank     -21       21
user_data           0         0
point_source_ID     154       182
gps_time 288095828.346449 288271560.378432
WARNING: range violates GPS week time specified by global encoding
bit 0
  Color R 256 65280
        G 256 65280
        B 256 65280
  attribute0        0         0 ('Original__cloud__index')
WARNING: there is coordinate resolution fluff (x10) in XY
number of first returns:      105862424
number of intermediate returns: 1464343
number of last returns:      105862151
number of single returns:    85427096
overview over number of returns of given pulse: 85427096 37978276
4283505 72590 355 0 0
histogram of classification of points:
  1106416 unclassified (1)
  47876005 ground (2)
  11463133 low vegetation (3)
  15357962 medium vegetation (4)
  14466862 high vegetation (5)
  599239 building (6)
  8245 noise (7)
  5706 water (9)
  36878254 overlap (12)
classification histogram with bin size 1.000000
bin 1 has 1106416
bin 2 has 47876005
bin 3 has 11463133
bin 4 has 15357962
bin 5 has 14466862
bin 6 has 599239
bin 7 has 8245
bin 9 has 5706
bin 12 has 36878254
average classification 5.567058475418423 for 127761822 element(s)

```

7.3 ANEXO 3: Código en R para el análisis y validación del Modelo Digital de Elevaciones.

```
# BIBLIOTECAS -----  
  
library(terra)  
library(raster)  
  
#IMPORTAR RASTER MDE-----  
  
mde_obejo<-  
rast('G:/HIDROLIVAR_AM_local/Datos_carcavas/MDE/mde_cortado_sin_hue  
cos.tif')  
mde_control_obejo<-  
rast('G:/HIDROLIVAR_AM_local/Datos_carcavas/MDE/DEM_pnoa_recorte.ti  
f')  
  
# CÓDIGO -----  
par(family = "serif")  
  
valor_minimo <- min(mde_obejo[], na.rm = TRUE)  
valor_maximo <- max(mde_obejo[], na.rm = TRUE)  
  
# Histograma de elevaciones  
hist(mde_obejo, main="Histograma de Elevaciones (Obejo)",  
      xlab="Valores de Elevaciones",  
      ylab="Píxeles",  
      col="darkolivegreen4", border="white")  
  
legend_text <- paste("Mínimo:", round(valor_minimo, 2),  
                    "\nMáximo:", round(valor_maximo, 2))  
legend("topright", legend = legend_text,  
       bty = "o", cex = 0.9)  
  
# COMPARACIÓN MDE LiDAR con MDE control de PNOA -----  
-----  
  
# Remuestreo de MDE PNOA para que tengan la misma dimensión.  
  
mde_control_resampled <- resample(mde_control_obejo, mde_obejo,  
method = "bilinear")  
  
#Extracción de valores de MDE. Eliminación de valores nulos  
  
valores_LiDAR <- values(mde_obejo, na.rm = TRUE)  
valores_control <- values(mde_control_resampled, na.rm = TRUE)  
  
# Gráfico de dispersión (scatter plot)  
plot.new()  
par(family = "serif")  
plot(mde_obejo, mde_control_resampled,  
      main = "Comparación de Elevaciones entre MDE (Obejo)",
```

```

        xlab = "Elevaciones MDE LiDAR",
        ylab = "Elevaciones MDE Control",
        col = "blue", pch = 19, cex = 0.5)

# Línea x=y de referencia
abline(0, 1, col = "red", lwd = 2)

# CASO DE PENOLITE-----
-----

mde_penolite<-
rast('G:/HIDROLIVAR_AM_local/JAEN_Penolite/1_CUENCA/MDE_fill/MDE_fi
lled_corr_cuenca.tif')
mde_control_penolite<-
rast('G:/HIDROLIVAR_AM_local/JAEN_Penolite/1_CUENCA/MDE_PNOA/MDE_PN
OA.tif')

# CÓDIGO -----
par(family = "serif")

valor_minimo <- min(mde_penolite[], na.rm = TRUE)
valor_maximo <- max(mde_penolite[], na.rm = TRUE)

# Histograma de elevaciones
plot.new()
hist(mde_penolite, main="Histograma de Elevaciones (Peñolite)",
      xlab="Valores de Elevaciones",
      ylab="Píxeles",
      col="darkolivegreen4", border="white")
legend_text <- paste("Mínimo:", round(valor_minimo, 2),
                    "\nMáximo:", round(valor_maximo, 2))
legend("topright", legend = legend_text,
       bty = "o", cex = 0.9)

# COMPARACIÓN MDE LiDAR con MDE control de PNOA -----
-----

# Remuestreo de MDE PNOA para que tenga la misma dimensión
mde_control_resampled <- resample(mde_control_penolite,
mde_penolite, method = "bilinear")

#Extracción de valores de MDE. Eliminación de valores nulos

valores_LiDAR <- values(mde_penolite, na.rm = TRUE)
valores_control <- values(mde_control_resampled, na.rm = TRUE)

# Gde dispersión (scatter plot)
plot.new()
par(family = "serif")
plot(mde_penolite, mde_control_resampled,
      main = "Comparación de Elevaciones entre MDE (Peñolite)",
      xlab = "Elevaciones MDE LiDAR",
      ylab = "Elevaciones MDE Control",
      col = "blue", pch = 19, cex = 0.5)

# Línea x=y de referencia
abline(0, 1, col = "red", lwd = 2)

```