

CUARTA ÉPOCA

GEOGRAPHICALIA

1977 - 1988 - 2000 - 2023



EDITORIAL:

Monográfico geomorfología
Desde la Geografía a
la Geomorfología global
en Aragón
Dr. José María García Ruiz

ARTÍCULOS:

Monográfico geomorfología
Cartografía biogeomor-
fológica | Erosión por piping
| Zonificación de aludes
Sección general
Patrones asentamiento
culturas Calima | Dinámica
territorial Grados Geografía

MAPAS:

Monográfico geomorfología
Mapa geomorfológico de la
Bárdena Blanca (Navarra,
España) | Mapa geoarque-
ológico de El Pichao
(Tucumán, Argentina)

NOTAS DE INVESTIGACION
Y RESEÑAS:

Monográfico geomorfología
Análisis hidromorfológico
de ríos efímeros | VOLTUR-
MAC: volcans-turismo
Sección general
Estrategias de recuperación
de cubierta vegetal



1542

Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



Evaluación de la degradación de terrenos agrícolas por procesos de erosión por piping a partir de la reconstrucción del paisaje histórico mediante técnicas de fotogrametría automatizada

Sara del Carmen Carreras Gómez

Evaluación de la degradación de terrenos agrícolas por procesos de erosión por piping a partir de la reconstrucción del paisaje histórico mediante técnicas de fotogrametría automatizada

Sara del Carmen Carreras Gómez

Servicio de Apoyo a la Investigación (SAI), Universidad de Zaragoza

Geóloga, 50008 (Zaragoza)

scarreras@unizar.es

sarainf98@gmail.com

Resumen: La erosión subsuperficial es un proceso relativamente común en áreas semiáridas y llevan asociados una serie de efectos negativos, como la degradación de los campos de cultivo. El presente trabajo analiza el caso de los Aguerales de Valpalmas (Zaragoza), estudiando la evolución de las superficies cultivadas desde mediados del S.XX hasta la actualidad desde un punto de vista planimétrico y volumétrico. La aplicación de herramientas SIG muestra cambios en su distribución cuantificando una pérdida superficial del 10% respecto a su estado en 1957. Por otro lado, la aplicación de técnicas de fotogrametría digital automatizada ha permitido la reconstrucción del paisaje histórico y la comparación entre modelos, obteniendo una pérdida de suelo de unos 2.600 m³. Este tipo de estudios mejoran la estimación de la magnitud de los procesos de erosión y sus efectos sobre las superficies agrícolas a lo largo de los años.

Palabras clave:

Erosión por piping, pérdida de suelo, fotogrametría, agricultura.

Assesment of agricultural land degradation due to erosion processes by piping from historical landscape reconstruction using automated photogrammetry techniques

Abstract: Piping erosion is a relatively common process in semiarid areas and has a series of negative effects associated to it, such as the degradation of crop fields. The present work analyses the case of the Aguerales de Valpalmas (Zaragoza), studying the evolution of cultivated areas since mid-twentieth century to the present from a planimetric and volumetric point of view. The application of GIS tools shows changes in their distribution, quantifying a superficial loss of 10% compared to their situation in 1957. On the other hand, the application of automated digital photogrammetry techniques allowed us to reconstruct the historical landscape and the comparison between models, obtaining a loss of soil of about 2,600 m³. This type of study improves magnitude estimation of erosion processes and their effects on agricultural land.

Keywords:

Piping, soil loss, photogrammetry, agriculture.

Recibido: 17-11-2024. Aceptado: 27-12-2024.

DOI: 10.26754/ojs_geoph/geoph.20247611207

1. Introducción

LOS PROCESOS DE SUFOSIÓN o *piping* están estrechamente relacionados con el desarrollo y evolución de zonas acaravadas o *badlands*, un particular tipo de paisaje que destaca por su elevada dinámica geomorfológica donde la erosión ha alterado significativamente el sustrato (generalmente poco resistente), siendo especialmente frecuente en zonas áridas, aunque no exclusivamente (Harvey, 2004). Originalmente han sido considerados paisajes de origen fluvial con una elevada densidad de drenaje caracterizados por profundos valles y pronunciadas pendientes, pero el aumento en el número de estudios geomorfológicos ha hecho que la aplicación de este término también incluya: (i) zonas donde los procesos de erosión combinados con los procesos fluviales dan lugar a paisajes escabrosos y caóticos y (ii) grandes áreas donde la mala gestión de los usos del suelo ha provocado la alteración del equilibrio natural y la degradación del paisaje (Bryan y Yair, 1982). Las condiciones bajo las que se suelen formar los badlands hacen que su desarrollo esté asociado a regiones áridas o semiáridas, pero la realidad es que pueden formarse bajo condiciones climáticas muy distintas y se encuentran ampliamente distribuidos a escala global (Moreno-de las Heras y Gallart, 2018).

Uno de los procesos de erosión más comunes en los badlands es el llamado *piping* o sufosión. Este concepto puede entenderse de varias maneras y su definición formal ha sido ampliamente debatida por autores como Parker y Higgins (1990), Bryan y Jones (1997), Richards y Reddy (2007) o Wilson et al. (2013, 2018), pero en general se puede entender como el proceso de formación de conductos lineales subsuperficiales (*pipes*) en suelos o sedimentos poco consolidados (Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018). Su formación se debe a la combinación de diferentes factores ambientales como las características del suelo, la topografía, el gradiente hidráulico local y las condiciones climáticas locales (Gutiérrez et al., 1997), siendo especialmente importantes las características fisicoquímicas del suelo. Ternan et al. (1988) afirman que la presencia de arcillas expansivas (como la montmorillonita, la illita o la caolinita), valores de SAR (Sodium Adsorption Ratio) por encima de 0.4 y elevados niveles de dispersión y sodio intercambiable son los principales causantes del *piping* en un suelo. También se debe tener en cuenta cualquier otro factor que favorezca la canalización, como la presencia de grietas, conductos o madrigueras en el sustrato (Harvey, 2004).

La evolución del *piping* supone el desarrollo de una red de conductos subsuperficiales (a menos de cinco metros de profundidad) que se ve favorecido por la presencia de niveles poco permeables que permitan la circulación horizontal. Estos *pipes* pueden llegar a colapsar debido al peso del sustrato suprayacente y generar cavidades de dimensiones variables. El estudio de su distribución ha sido uno de los métodos de estudio de los procesos de *piping* más comunes, aunque Bernatek y Kondracka (2016) señalan que los resultados pueden subestimar su extensión real hasta en un 50% y otros autores aseguran que aún no existen métodos que permitan crear modelos de predicción fia-

bles (Wilson et al., 2017a; Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018). Los elevados costes económicos y logísticos que llevan asociados este tipo de estudios hacen que sean considerados uno de los procesos más difíciles de estudiar y cuantificar (Faulkner, 2013).

En general, la erosión del suelo se percibe como uno de los problemas ambientales más importantes a escala global (López-Bermúdez, 2002). Se trata de un elemento natural que cumple muchas funciones ecosistémicas fundamentales: regulación de procesos (como la infiltración de agua o el almacenamiento de carbono), refugio de biodiversidad, proveedor de recursos (alimentos, biomasa, materiales, etc.) o el propio soporte sobre el que se desarrollan las actividades humanas (Keesstra et al., 2021; Koppitke et al., 2019; Tóth et al., 2013), entre otros. Se trata de un problema especialmente acuciante en regiones de clima contrastado bajo una fuerte presión antrópica. Este es el caso de las regiones mediterráneas, donde la intensidad de las precipitaciones, la abundancia de afloramientos de rocas fácilmente meteorizables y la escasa cobertura vegetal favorecen la acción de los procesos de erosión y la formación de paisajes tipo badland (García-Ruiz y López-Bermúdez, 2009).

Por otro lado, muchos autores insisten en la importancia de los cambios de los usos del suelo a la hora de hablar sobre la erosión del suelo en España, un país cuya historia ha alterado el territorio a lo largo de los siglos. Durante la época romana se produjeron importantes cambios en las superficies arboladas para la ampliación de las zonas de cultivo y el pastoreo, reduciendo su extensión a la mitad de su estado original (Urteaga, 1987) y durante el S.XIII fueron otorgados extensos privilegios a los pastores debido al notable desarrollo de su actividad durante el último siglo, impulsando el auge de la ganadería lanar a costa del bosque. No fue hasta el S.XVII que se abordó la alarmante situación de los bosques mediterráneos mediante ordenanzas que prohibían su destrucción y planeaban su recuperación mediante reforestaciones, siendo en definitiva insuficientes y perpetuando esta problemática. En la actualidad se cuenta con el Plan Nacional de Actuaciones Prioritarias en materia de Restauración Hidrológico-Forestal, control de la Erosión y lucha contra la Desertificación, que se encuentra ligado a otros instrumentos de ordenación nacional como el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), el Plan Forestal Español, el Plan Nacional de Restauración Hidrológico-Forestal y los Planes Hidrológicos de Cuenca. Por último, el Real Decreto 1415/2000 establece la realización de un Inventario Nacional de Erosión del Suelo (INES) con el objetivo de localizar, cuantificar y analizar la evolución de los procesos de erosión, constituyendo un sistema de datos de fácil acceso que facilite la participación y educación ciudadana.

A pesar de la importancia que ha tenido la agricultura a lo largo de la historia de España, uno de los hitos más notables fue el súbito abandono de tierras de cultivo durante el S.XX..

Constituyó un fenómeno global motivado por factores muy diversos, donde autores como Lasanta et al. (2021) listan algunos de los motivos principales: (i) migración y envejecimiento de la población rural, (ii) mecanización de las tareas agrícolas (abandonando los campos menos accesibles), (iii) baja productividad de los campos, (iv) la elevada competitividad de los mercados, (v) los efectos de la Política Agrícola Común (PAC) (que entre 1989 y 2008 incentivó el abandono de tierras agrícolas de manera temporal o permanente), (vi) la existencia de ocupaciones alternativas y (vii) factores vinculados a la mala gestión de los campos (sobreexplotación y salinización del suelo, reiteración de cultivos hortícolas intensivos, proliferación de problemas fitopatológicos, abandono de prácticas tradicionales de conservación del suelo, etc.). A pesar de constituir un proceso generalizado, la bibliografía relativa al abandono de tierras de cultivo en España es relativamente escasa. Dado a que el primer documento que permitió cuantificar este fenómeno fue la fotografía aérea de 1956, pueden distinguirse dos etapas principales: una primera fase de abandono previa a dicho año que está vinculada únicamente a los factores físicos locales (parcelas de fuerte pendiente con suelos poco fértiles) y una segunda fase en la que el abandono está relacionado con la integración de cada región en la economía nacional (ya que las parcelas más fácilmente mecanizables tienen una mejor accesibilidad al mercado). Se estima que en España se abandonaron 995.599 ha entre 1989 y 1993, afectando fundamentalmente a comarcas de secano cerealista con grandes explotaciones, y se comprobó que la influencia de la PAC afectó principalmente a los secanos semiáridos (Lasanta, 1996). Este abandono ha progresado recientemente en las zonas se-

miáridas del sureste de España y del centro de la Depresión del Ebro debido a la baja productividad de las tierras de secano y a problemas ligados con la salinización y degradación de los suelos (Lesschen et al., 2007; Romero-Díaz et al., 2007; Fister y Ries, 2009; Alonso-Sarría et al., 2016a), como es el caso de la zona de estudio que se contempla a continuación.

El presente trabajo evalúa desde un punto de vista planimétrico y volumétrico la evolución de una zona tradicionalmente dedicada a la agricultura situada en el sector central de la Depresión del Ebro que ha sido transformada por los procesos de erosión: los Aguerales de Valpalmas. La hipótesis de partida plantea que el progresivo abandono de los campos de cultivo que ha experimentado la zona se debe a estos procesos, especialmente a los efectos del piping, muy activo en el área de estudio. Por ello, el objetivo principal es realizar una cuantificación de los cambios en las superficies agrícolas asociados a la acción de estos procesos de la variación volumétrica del suelo allí donde estas superficies han experimentado una reducción en su extensión. Esto ha sido posible gracias a la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con las que se ha analizado la evolución en planta de cada campo por separado, y a la reconstrucción del paisaje histórico con fotogrametría digital automatizada, que ha permitido recrear los modelos de periodos anteriores necesarios para el estudio volumétrico a una escala temporal más amplia. Por otro lado, también se pretende profundizar en la dinámica geomorfológica de los Aguerales con la elaboración de cartografías que reflejen la evolución de los procesos de erosión a lo largo del tiempo.

2. Área de estudio

LOS AGUERALES DE VALPALMAS es una formación geológica situada en el sector central de la Depresión del Ebro, en la comarca de las Cinco Villas, al noroeste de la provincia de Zaragoza (Aragón, España). Se trata de un paraje de especial valor científico declarado Lugar de Interés Geológico (LIG) en el año 2015 por el Gobierno de Aragón con el código ARP035 ("Badlands de los Aguerales de Valpalmas") (Figura 1).

El área de estudio seleccionada tiene una extensión total de 124 ha que incluye el propio LIG y su cuenca de drenaje, por lo que el estudio contempla los procesos erosivos que se desarrollan tanto en los Aguerales como en su entorno próximo. El área comprende altitudes entre 460 y 625 m.s.n.m. y muestra muchos de los factores que favorecer el desarrollo de procesos erosivos (como la escasez de vegetación), pero el más importante es el aumento del gradiente hidráulico local debido a la progresiva incisión del barranco Barreiro, situado al sureste del área de estudio. La evolución de estos procesos da lugar a la formación de un paisaje tipo badland, siendo especialmente notable en la zona sur del área de estudio donde en la actualidad se están formando

una extensa red de pipes interconectados, grietas, cavidades, abarrancamientos y una gran variedad de estructuras con forma de pináculo (Figura 2 A, Figura 2 B y Figura 2 C).

En general, se trata de un paisaje muy modificado por las actividades humanas. La agricultura es la actividad principal en el área y está dominada por cultivos cerealistas de secano, cuyo ciclo de vida supone la exposición del suelo durante largos periodos de tiempo, facilitando su degradación y la infiltración del agua. Además, su necesidad de expansión durante épocas pasadas ha causado la alteración de los pisos de vegetación de la zona, predominando casi exclusivamente las especies de porte arbustivo como el romero (*Salvia rosmarinus*) y el tomillo (*Thymus vulgaris*) (Figura 2 D).

Climatológicamente se trata de un área semiárida con una precipitación media anual de 526 mm donde las precipitaciones suelen ocurrir en forma de fuertes tormentas durante los meses de primavera u otoño y con una temperatura media anual de 13 °C, correspondiéndose a un clima mediterráneo continentalizado.

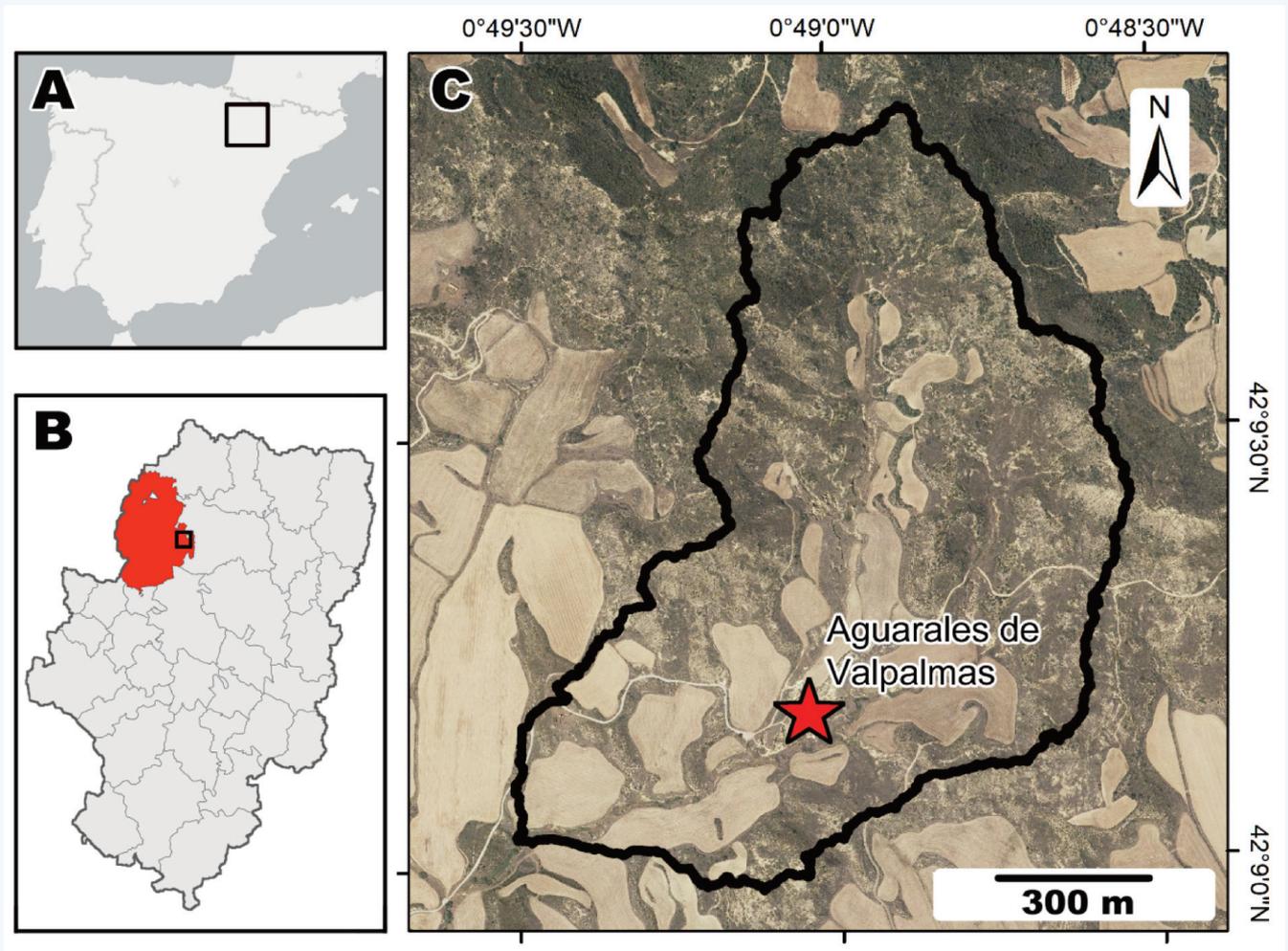


Figura 1. A) Localización del área de estudio en España. B) Localización del área de estudio en Aragón, dentro de la comarca de las Cinco Villas (remarcado en rojo). C) Delimitación del área de estudio (línea negra) y localización exacta del LIG ARP035 (estrella roja).

Fuente: Elaboración propia.

3. Metodología

AL INICIO del planteamiento del presente trabajo se realizó una visita al área de estudio para realizar una primera toma de contacto, recorriendo la extensión del LIG, verificando la extensión de los procesos de erosión en los campos de cultivo cercanos y tomando fotografías de los fenómenos más destacables. Tras haber obtenido una idea general del área a estudiar, se inició el análisis geomorfológico.

El punto de partida para el estudio planimétrico han sido las ortofotografías históricas de periodos temporales sucesivos: 1957, 1977 y 1997, así como fotografías del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) del año más reciente disponible (2021) (Figura 3 A, B, C y E), permitiendo observar cambios en una secuencia temporal más o menos regular (20 años para las ortofotografías históricas y 24 años para el periodo más actual). También se decidió incluir la fotografía del año 2009

para poder realizar un estudio más detallado de la última década de evolución (Figura 3 D). Todas estas fotografías han sido obtenidas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y sus características pueden consultarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas de las fotografías utilizadas (obtenidas del CNIG)

Año	Resolución	Bandas	Fuente
1957	0,50 m	Pancromático	Vuelo Americano Serie B
1977	0,30 m	Pancromático	Vuelo Interministerial
1997	1,00 m	Pancromático	Vuelo Olistat
2009	0,50 m	RGB	Proyecto PNOA
2021	0,25 m	RGB	Proyecto PNOA

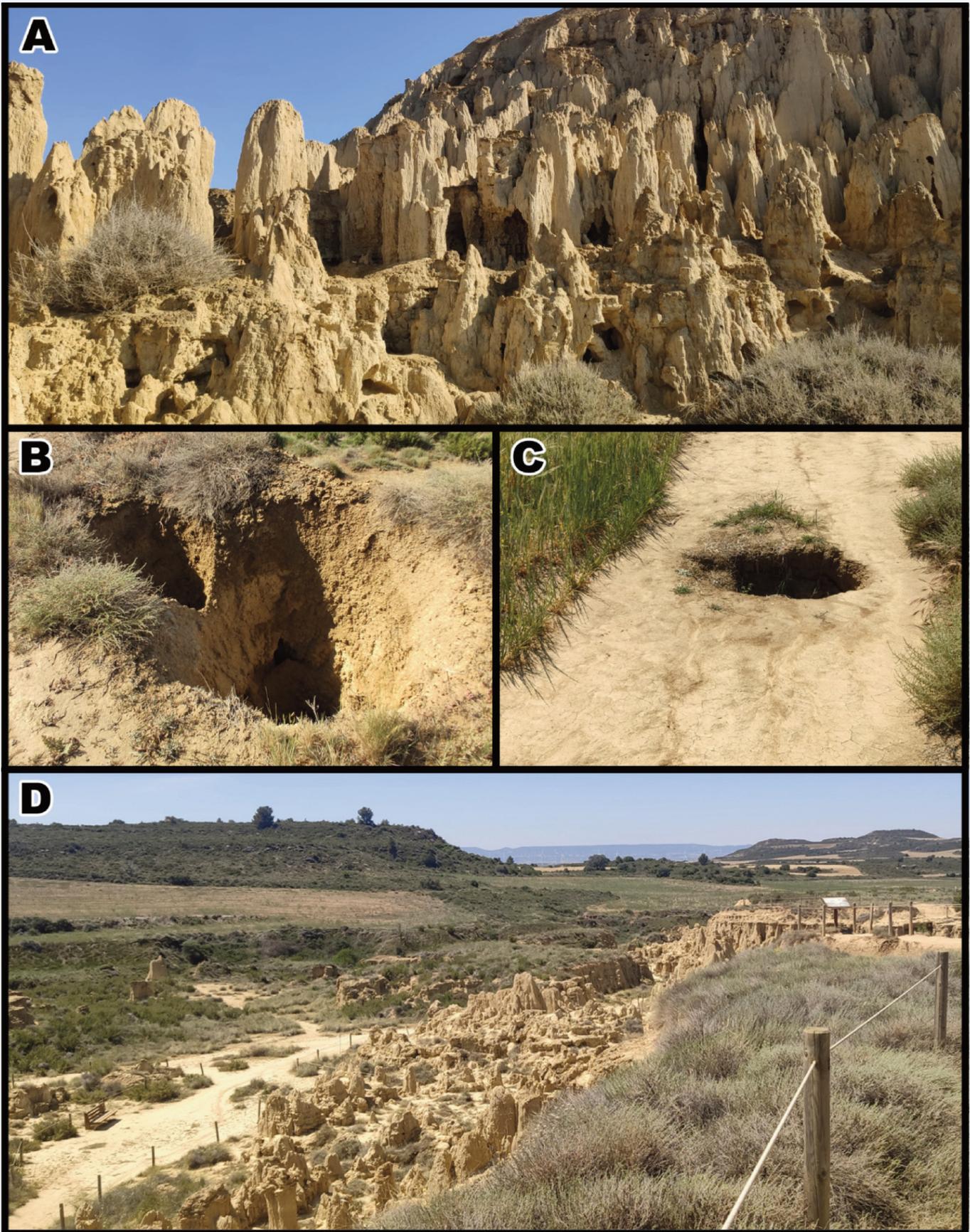


Figura 2. A) Estructuras en la pared del LIG. B) Coalescencia de cavidades. C) Cavidad limítrofe a un campo de cultivo en activo. D) Panorámica general. Fuente: Fotografías de la autora.

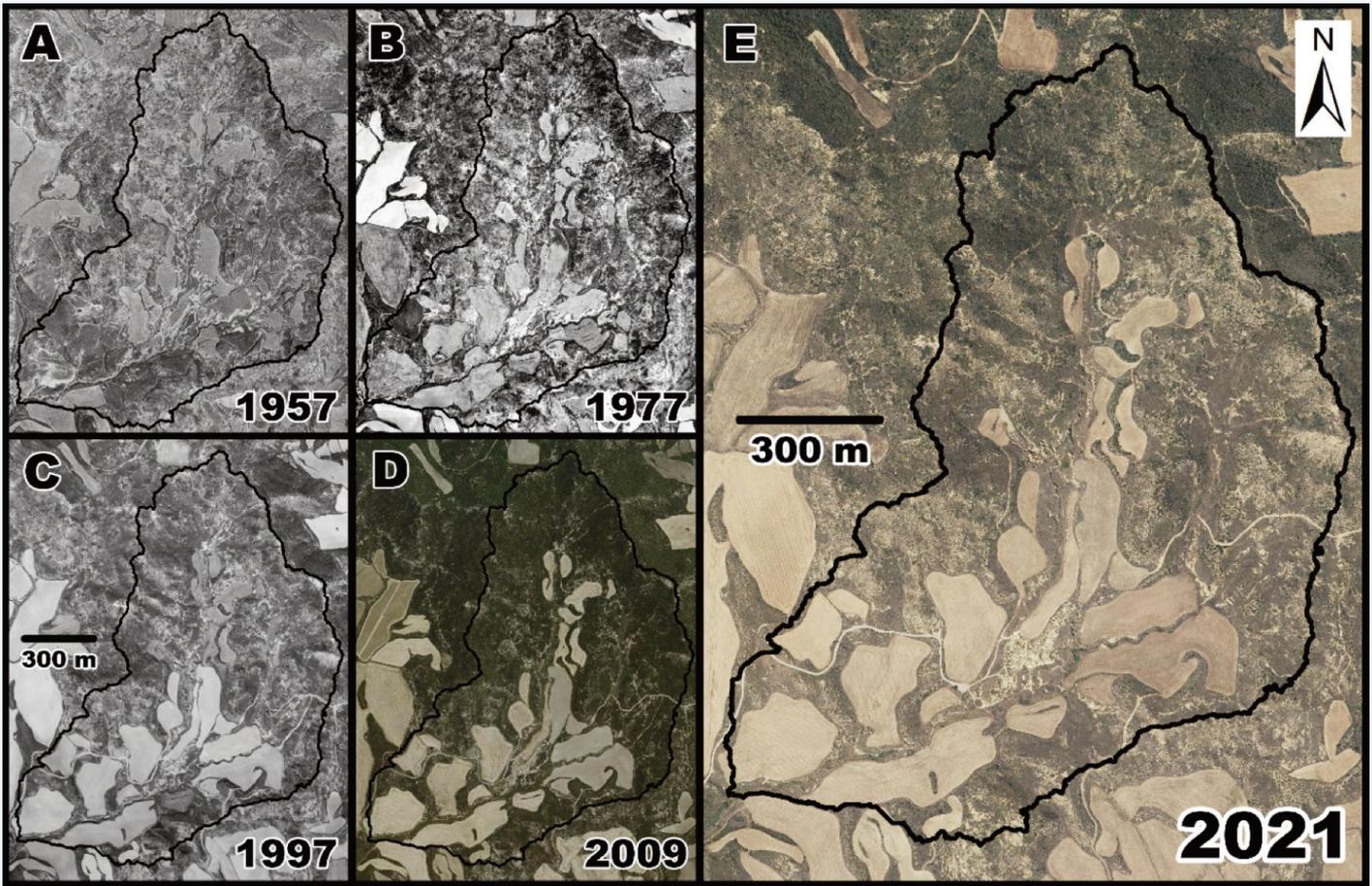


Figura 3. Fotografías utilizadas en el estudio planimétrico.
Fuente: Obtenidas del CNIG).

Estas fotografías han constituido la base para digitalizar las superficies agrícolas de cada año mediante SIG, obteniendo una serie de polígonos (cada uno representando un campo de cultivo individual) cuyas superficies son medibles y permitiendo calcular la superficie total ocupada por todas los campos en el área de estudio para cada año. Dicha digitalización se ha realizado usando una misma escala de visión (1:2.000) para obtener resultados representativos. Posteriormente se han exportado estos datos numéricos a hojas de cálculo para su tratamiento, realización de comparaciones y elaboración de diferentes gráficas.

Contar con una digitalización veraz de las superficies agrícolas también ha permitido observar los cambios entre los diferentes años: en ocasiones estos polígonos se superponen, indicando que dicha superficie se ha mantenido activa en ambos periodos de tiempo, pero también se observan polígonos que se extienden más allá de los que lo hacían en el otro periodo y viceversa, mostrando superficies que aumentan o disminuyen. Las cartografías obtenidas en este proceso se han denominado cartografías de cambio y han permitido observar detalladamente la evolución de la extensión de los campos de cultivo entre diferentes años (sucesivos o no). Así, se observan cuatro situaciones: (i) superficies de campo abierto (donde nunca ha habido cam-

pos de cultivo activos para los periodos temporales contemplados), (ii) superficies de cultivo (donde se ha mantenido la actividad en ambos periodos), (iii) superficies de aumento (donde los campos han aumentado (agrudación) su extensión) y (iv) superficies de reducción (donde los campos han disminuido (degradación) su extensión). La diferencia entre estas superficies de cambio ha permitido focalizar el cálculo de diferentes parámetros del terreno gracias a la aplicación de estadísticas zonales, ya que Arcmap permite calcular diferentes valores de celdas dentro de zonas definidas. Para este estudio se ha optado por los valores de altitud y pendiente, permitiendo realizar observaciones concretas en las zonas de mayor interés.

Por otro lado, el punto de partida para el estudio volumétrico fueron los Modelos Digitales del Terreno (MDT) de los diferentes periodos temporales seleccionados. Los MDT para los años 2010 y 2020 se han obtenido a partir del procesado de puntos de las nubes de puntos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ofrecidas por el proyecto PNOA-LiDAR disponibles a través del CNIG. Se trata de una tecnología que permite medir la distancia entre el punto de emisión del láser hasta un objeto o superficie emitiendo un pulso de energía que puede volver al sensor como uno o varios retornos, de-

pendiendo de la cantidad de superficies reflectantes que encuentre en su camino. El resultado final es una nube de puntos de alta precisión, los cuales son clasificados en función del tipo de objeto que reflejó el pulso láser gracias a un algoritmo automático por la clasificación definida por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS). Este algoritmo distingue entre diferentes elementos como el suelo, diferentes tipos de vegetación (baja, media y alta), edificaciones, cuerpos de agua, etc. Sin embargo, se ha observado que dicha clasificación es poco precisa para gran parte del área de estudio, especialmente en aquellas zonas más afectadas por los procesos de erosión. Se estima que la razón de este error reside en la propia morfología del área, ya que el valle central forma desniveles muy pronunciados a la vez que presenta un gran número de estructuras piramidales producto de la acción de los procesos de erosión sobre el sedimento, además de presentar otras estructuras dispersas como colapsos y profundas cárcavas. Debido a esto, muchos de los puntos de las nubes de los años 2010 y 2020 están incorrectamente clasificados, por lo que para el presente trabajo se ha optado por realizar una reclasificación manual con el programa CloudCompare. Esto ha permitido diferenciar correctamente el tipo de punto y tener en cuenta únicamente los retornos correspondientes a suelo para obtener un MDT fiable y sin la influencia de otros elementos del paisaje.

4. Resultados

EN LA FIGURA 4 se pueden observar los campos de cultivo digitalizados (polígonos) por cada periodo temporal contemplado (1957, 1977, 1997, 2009 y 2021 respectivamente). A simple vista se aprecia un mayor número de polígonos en los primeros periodos, aunque más fragmentados, mientras que en los periodos más recientes son más escasos pero menos dispersos.

La extensión de las superficies agrícolas en el área de estudio disminuye con el paso del tiempo (Figura 5). Esta pérdida es especialmente notable en el paso de 1957 a 1977, en el cual se pierden un total de 48.479,30 m² de campos de cultivo. En el resto de los periodos la pérdida no es tan acusada, pero en todos los casos el balance es negativo: se pierden 3.513,33 m² en el paso de 1977 a 1997; 6.337,27 m² en el paso de 1997 a 2009 y, por último, 11.275,59 m² en el paso de 2009 a 2021. Finalmente, si comparamos la situación de las superficies agrícolas entre los periodos temporales extremos (1957 y 2021) se obtiene una pérdida total de 69.605,62 m² de superficie agrícola (o 6,96 hectáreas). Teniendo en cuenta que la situación inicial en 1957 era de 352.018,53 m², esto represento una pérdida del 19,77% de la superficie inicial.

No es posible aplicar la tecnología LiDAR para obtener modelos de periodos anteriores al año 2009, por lo que para estos casos se ha optado por aplicar fotogrametría digital automatizada (*Structure from Motion* o SfM), una técnica que permite obtener nubes de puntos a partir de la identificación espacial de puntos comunes entre diferentes fotografías de una misma zona. Para ello se ha utilizado el programa Agisoft Metashape, obteniendo una primera nube de puntos de baja densidad a partir de la cual se ha obtenido una nube de puntos densa y, finalmente, un ortomosaico con el que generar el MDT. Esta técnica se ha empleado para generar el modelo del año 1977. La comparación de los MDT entre periodos sucesivos permite observar cambios geomórficos entre ellos y, posteriormente, cambios volumétricos. La extensión *Geomorphic Change Detection* (GCD) disponible en ArcMap ha permitido calcular esta diferencia, generando unos modelos de cambio topográfico denominados *DEMs of Difference* (DoD). Se trata de cartografías que muestran las zonas concretas en las que se produce una pérdida y ganancia de volumen. Además, durante este proceso se realiza una propagación de errores a partir de la fórmula de error cuadrático medio para descartar los puntos por debajo de este valor y obtener un resultado más fiable. Hay que tener en cuenta que siempre existen una serie de incertezas y errores en este tipo de análisis, siendo comunes los errores de georreferenciación y la resolución de los datos, especialmente de las fotografías históricas (Llena et al., 2018).

La obtención de estas superficies de cambio ha sido fundamental para poder obtener las estadísticas zonales de altitud y pendiente. La Tabla 2 muestra los valores medios para cada una de las diferentes situaciones en las cartografías de cambio: (i) superficies que nunca han sido explotadas como campos de cultivo (“nunca campo”), (ii) superficies de campos de cultivo que se han reducido (“reducción”), (iii) superficies que se han mantenido como campos de cultivo activos durante todo el periodo temporal (“siempre campo”) y (iv) superficies de campos de cultivo que han aumentado (“agradación”).

La elaboración de las diferencias de modelos de elevación del terreno o DoD constituye una parte fundamental y abarca uno de sus principales objetivos: el estudio de superficies agrícolas a partir de la reconstrucción del paisaje histórico con fotogrametría digital automatizada. Con esto se ha elaborado la Figura 6, donde se observa el DoD obtenido de la diferencia de los MDTs de los años 1977 y 2010 (DoD 1977-2010) en los que los cambios de volumen son representados en seis clases (tres para valores positivos (sedimentación, en naranja y rojo) y tres para valores negativos (erosión, en celeste y añil)). Esto

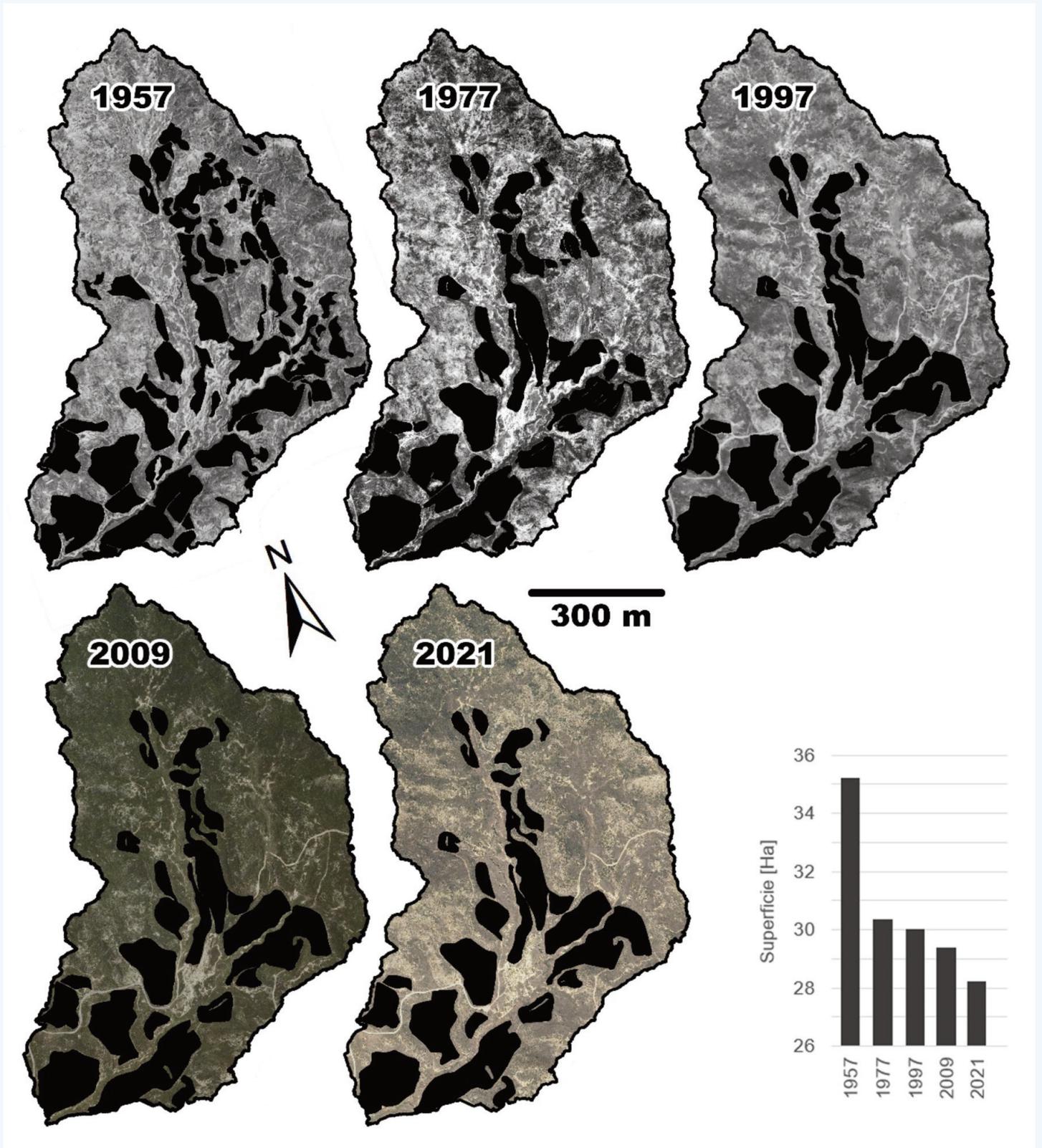


Figura 4. Polígonos obtenidos tras la digitalización de los campos de cultivo para cada año contemplado en el estudio (1957, 1977, 1997, 2009 y 2021). En la gráfica situada en la parte inferior derecha se representa gráficamente los valores numéricos de extensión total de estos campos.

Fuente: Elaboración propia.

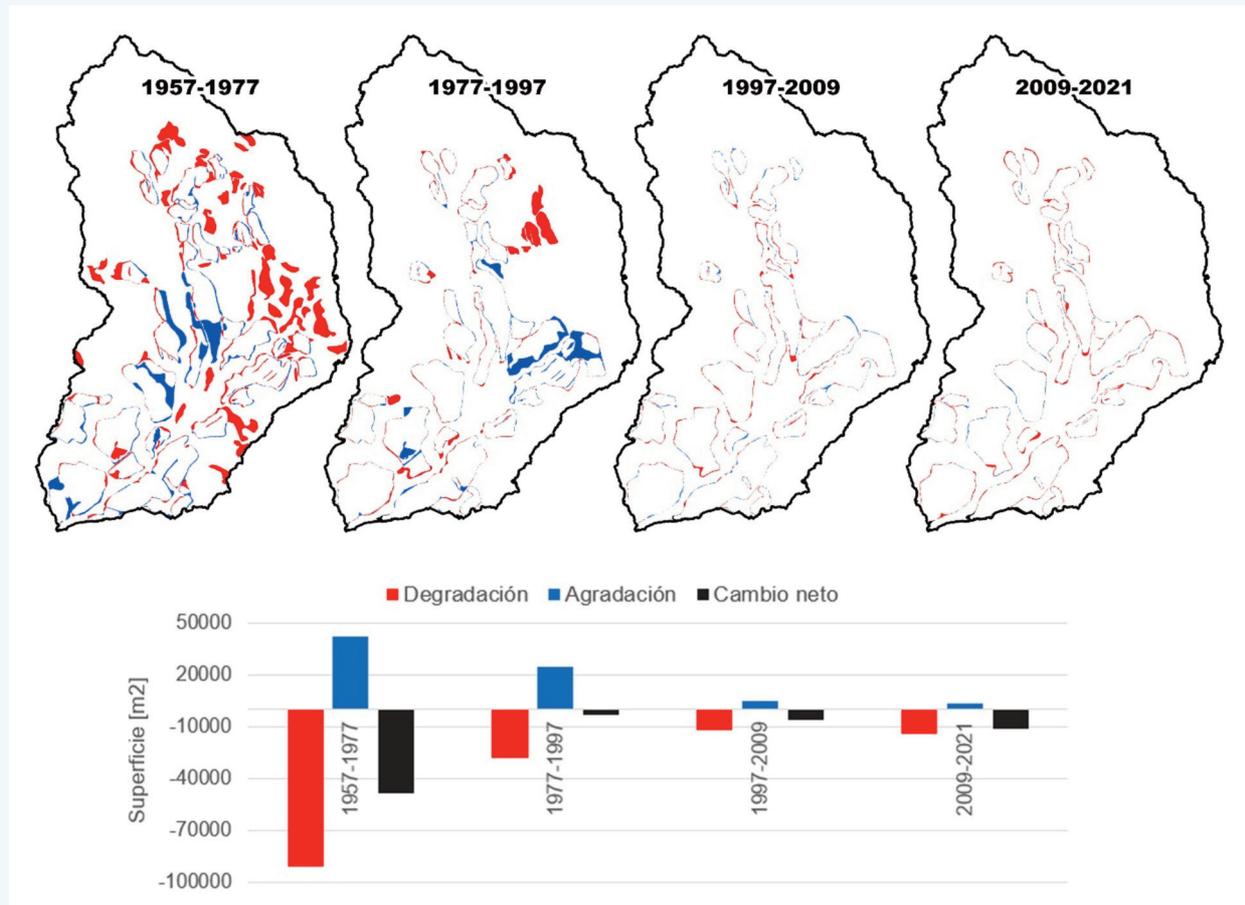


Figura 5. Cartografías de cambio de las superficies agrícolas entre años sucesivos, mostrando cambios negativos (degradación, en rojo) y cambios positivos (degradación, en azul).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Estadísticas zonales calculadas para las superficies de campo entre periodos sucesivos

Periodo	Clase	Altitud media (m)	Pendiente media (m)
1957-1977	Nunca campo	528,26	17,92
	Reducción	510,53	11,05
	Siempre campo	492,68	5,09
	Agradación	493,55	6,03
1977-1997	Nunca campo	527,45	17,54
	Reducción	506,65	9,77
	Siempre campo	491,38	4,76
	Agradación	493,41	6,73
1997-2009	Nunca campo	527,01	17,35
	Reducción	495,17	9,41
	Siempre campo	491,40	4,69
	Agradación	495,43	10,72
2009-2021	Nunca campo	526,73	17,30
	Reducción	494,95	8,78
	Siempre campo	491,30	4,56
	Agradación	493,88	8,48

permite diferenciar entre cambios leves (de cero a un metro), notables (de tres a ocho metros) y graves (más de ocho metros). De la misma manera se ha elaborado la Figura 7, donde se observa el DoD resultado de la diferencia de los modelos de elevación de los años 2010 y 2020. Aunque ambos DoD se han elaborado a escala de cuenca, dado a que el presente trabajo se centra en las zonas de degradación se ha optado por limitar esta cuantificación a zonas de reducción, cuyo valor numérico se puede consultar en la Tabla 3.

El primer DoD (Figura 6) representa un intervalo temporal de 33 años (desde 1977 hasta 2010), mientras que el segundo (Figura 7) tan solo abarca 10 años (desde 2010 hasta 2020), por lo que se deberá de tener en cuenta la diferencia de perspectiva temporal entre ambas cartografías. En total, representan un intervalo temporal de 44 años en los que se ha podido cuantificar los cambios volumétricos en el área de estudio. Las superficies de reducción obtenidas en la cartografía de cambio entre los años 1977 y 2009 se ha aplicado al DoD de 1977-

Tabla 3. Valores numéricos obtenidos a partir de los DoD en superficies de campo negativas (reducción)

	DoD 1977-2009	DoD 2009-2021
Volumen reducido (m ³)	2.283,60	650,05
Volumen agradado (m ³)	141,27	182,96
Cambio total (m ³)	2.424,87	833,01
Diferencia volumen neta (m ³)	-2.142,33	-467,09

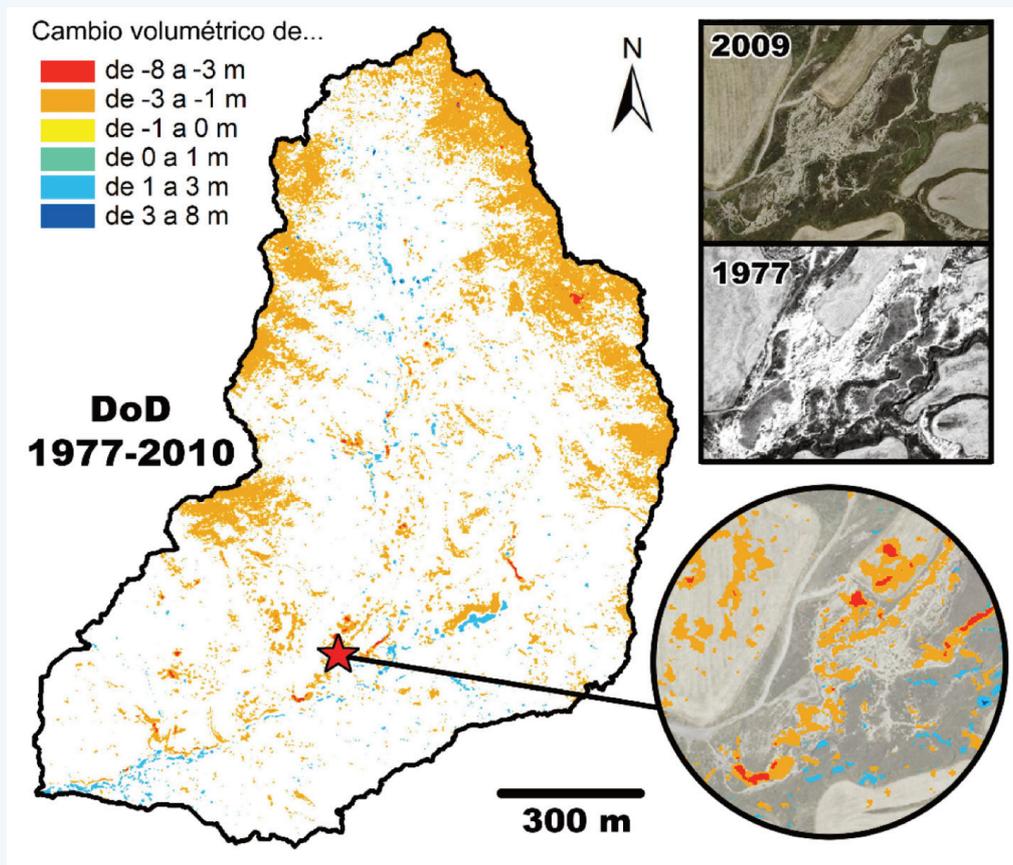


Figura 6. DoD entre los años 1977 y 2010 con detalle del LIG.

Fuente: Elaboración propia.

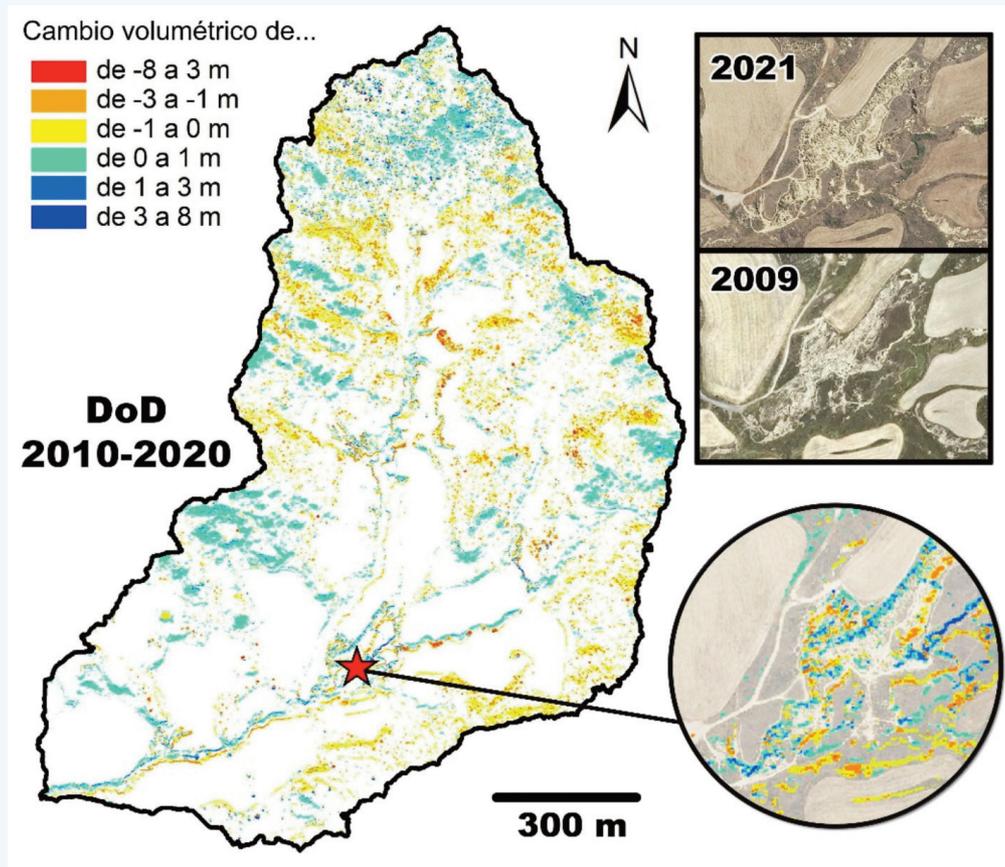


Figura 7. DoD entre los años 2010 y 2020 con detalle del LIG.
Fuente: Elaboración propia.

2010 para realizar la segregación, del mismo modo que se ha realizado para el DoD de 2010-2020 con la cartografía de cambio entre los años 2009 y 2021. Teniendo en cuenta ambos DoD y los datos numéricos obtenidos para las zonas de reducción, para el periodo entre 1977 y 2020 se estima un total

de 2.933,65 m³ de suelo erosionado y un total de 324,23 m³ de sedimentación. El cálculo neto resulta en la pérdida de -2.609,42 m³ de suelo agrícola a lo largo de 44 años de evolución (1977-2020) del área de estudio.

5. Discusión y conclusiones

UNA DE LAS CUESTIONES que mayor interés ha suscitado en el creciente número de publicaciones dedicadas al estudio de los badlands y los procesos de erosión en general en las últimas décadas es la cuantificación veraz de la pérdida de suelo, especialmente de suelo fértil y suelo agrícola. El presente trabajo analiza el caso de los Aguarales de Valpalmas, uno de los numerosos ejemplos que se pueden encontrar a lo largo de la Depresión del Ebro, empezando por el estudio de su dinámica geomorfológica. La extensa labor de revisión bibliográfica realizada a la vez que la existencia de trabajos previos en el área de estudio (Ferrer, 2016; Ferrer et al., 2017) ha permitido la definición en detalle de los Aguarales permitiendo identi-

ficar su contexto desde diferentes perspectivas. Probablemente la más importante y la que guarda una mayor relación con los procesos de erosión es el contexto geológico de los Aguarales: situado sobre un basamento terciario constituido principalmente por sedimento fácilmente erosionable junto a la presencia de arcillas expansivas, ciertas características físico-químicas del suelo (como los elevados niveles de dispersión y sodio intercambiable) y factores locales favorables (como la pendiente o el gradiente hidráulico) hacen del área de estudio un lugar propicio para el desarrollo y la expansión de los procesos de erosión como el piping, ampliamente extendido en la actualidad.

Se podría decir que el análisis geomorfológico ha constituido la mayor parte del presente trabajo, donde una gran parte del tiempo ha sido destinado al desarrollo del estudio planimétrico y el estudio volumétrico. La digitalización de las superficies agrícolas para cada uno de los periodos temporales contemplados ha sido una de las tareas más importantes y base para muchos de los procedimientos posteriores. Como se ha comentado anteriormente, destaca la marcada reducción de las superficies agrícolas entre el año 1957 y 1977: esta época coincide con los años de máximo apogeo del abandono agrícola en las llanuras y montañas del campo español (Lasanta et al., 2021), por lo que se estima que esta mayor pérdida no este únicamente relacionada con los efectos de los procesos de erosión sobre los campos de cultivo, sino también a los problemas encontrados por los agricultores de la zona a la hora de sacar partido a sus cultivos. Algunos de los campos que dejan de ser productivos después de 1957 se encuentran a una mayor altitud, a una mayor distancia de las principales (ya de por sí pocas) vías de comunicación en el área o poseen valores de pendiente elevados, haciéndolos poco adecuados para la implantación de las técnicas agrícolas mecanizadas que empezaron a desarrollarse durante la segunda mitad del S.XX y que son ampliamente utilizadas en la actualidad. Estos hechos pueden observarse en las estadísticas zonales, donde los valores de altitud y pendiente calculados para las zonas de reducción indican superficies perdidas a mayores altitudes y con mayor pendiente entre 1957 y 1997. Esto pudo provocar que muchos de estos campos peor accesibles fueran poco productivos y no rentables a largo plazo, propiciando su abandono en busca de terrenos que ofrezcan mejores oportunidades. Sin embargo, otros muchos campos de cultivo se han mantenido activos en el área de estudio (aunque hayan cambiado su forma o extensión a lo largo de los años), especialmente aquellos situados en la parte central de la cuenca, próximos al LIG.

Se trata de la zona donde los procesos de erosión alcanzan su mayor magnitud, pero al mismo tiempo también es la zona que ofrece mejores condiciones para el laboreo agrícola al tratarse de superficies más o menos llanas próximas a vías de comunicación. Muchos de estos campos están siendo afectados negativamente por los procesos de erosión, observándose el desarrollo de cárcavas y colapsos, aunque son evidentes los esfuerzos de la población local por intentar mantener estas superficies agrícolas durante el mayor tiempo posible. Las cavidades generadas por los colapsos son rellenadas con sedimento, y, en ocasiones, la morfología del campo es adaptada para rodear estas zonas problemáticas a la vez que se continua la actividad agrícola. Aunque se trate de una solución temporal, es de esperar que la expansión de los procesos de erosión alcance magnitudes que no sean posibles de compensar a largo plazo y los agricultores se vean obligados a abandonar estos campos o, al menos, reducir su extensión (como ya ha ocurrido en algunos casos). Partiendo de la base de que la magnitud de las activi-

dades agrícolas en el área de estudio y sus alrededores no es de importancia significativa, es de esperar que la que se mantiene hoy en día acabe trasladándose a otras zonas de la Depresión del Ebro o que, simplemente, vaya perdiendo entidad hasta convertirse en un uso residual del territorio.

Este proceso plantea nuevas cuestiones: ¿cuáles pueden ser los efectos hidrológicos y geomorfológicos del abandono de las tierras de cultivo? En general, se acepta que el abandono favorece una reducción de la erosión y de la escorrentía, pero no siempre es así, ya que también depende de las condiciones climáticas y del tipo de gestión a la que se sometan estas superficies después del abandono (García-Ruiz y López-Bermúdez, 2009). Estudios realizados en parcelas donde la pendiente es la principal causa de abandono como Molina (2002) muestran una espectacular recuperación de la vegetación sobre los antiguos campos de cultivo y la expansión de espacios forestales, comprobando que durante las primeras décadas después del abandono se produce una colonización del espacio por especies herbáceas y matorrales. Por otro lado, estudios dedicados al comportamiento geomórfico tras el abandono de los campos como Ruiz-Flaño (1993) demuestran que los campos más antiguos son los que presentan deterioros más graves y plantean dos posibles interpretaciones: (i) tras el abandono los procesos de erosión son más activos, movilizandando más cantidad de suelo y aumentando la pedregosidad o (ii) que es posible que correspondan a suelos de peor calidad. Teniendo en cuenta esto, la acusada pérdida de superficies agrícolas entre los años 1957 y 1977 no se puede asociar únicamente a los procesos de erosión, se debe realizar una exclusión de los campos de cultivo que durante ese periodo fueron abandonados debido a las propias características del campo que hacía de su explotación una opción poco viable. Para ello se ha elaborado una nueva cartografía (Figura 8) en la que se han señalado los campos cuya principal causa de abandono hipotéticamente no tiene relación con los procesos de erosión. Considerando que la estimación inicial planteaba una pérdida del 19,77% de superficies agrícolas durante el periodo entre 1957 y 2021, la exclusión de estos campos que en total suman un total de 34.438 m² suponen una disminución de la estimación inicial a un 10%.

Respecto al estudio volumétrico, los resultados obtenidos a partir de la diferencia de MDTs permiten observar que gran parte de la pérdida de suelo se concentra en la zona central del área de estudio, próximos a los Aguerales, donde es más lógico que los procesos de erosión muestren una mayor magnitud. Sin embargo, también se ha observado que las zonas afectadas por el piping se han ido expandiendo por el área de estudio desde su centro, ramificándose en diferentes direcciones. Los cambios volumétricos observados para el periodo entre 1977 y 2010 se concentran en los montes de la parte norte de la cuenca, pero este hecho posee una razón metodológica: el modelo empleado para el año 1977 obtenido por fotogrametría

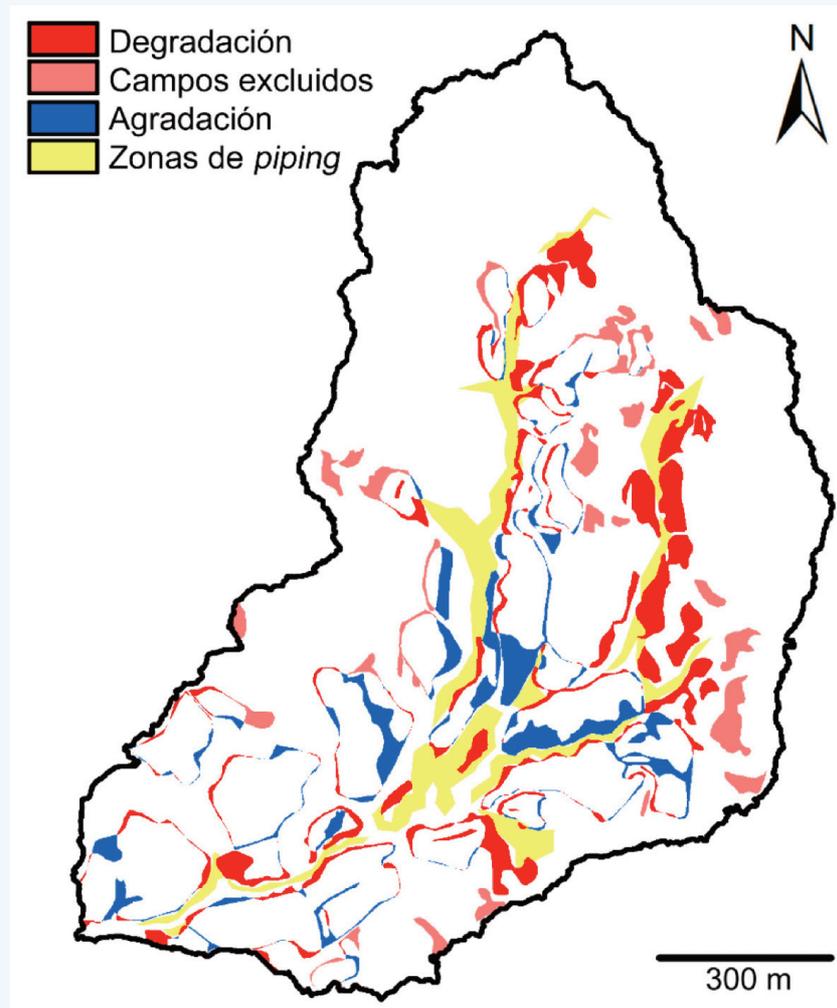


Figura 8. Cartografía de cambio entre 1957 y 2021 donde se han diferenciado los campos de cultivo cuyo principal motivo de abandono no es la acción de los procesos de erosión.

Fuente: Elaboración propia.

se trata de un modelo digital de superficies, que incluye la vegetación, mientras que el modelo empleado para el año 2010 es un modelo digital del terreno, que es capaz de diferenciar la vegetación y no tenerla en cuenta. Por esto, la diferencia calculada en un punto para el que uno de los modelos no interpreta la vegetación respecto a otro que sí lo hace da lugar a dicha concentración de puntos considerados como cambio volumétrico negativo. Este problema es solventado centrandose los cálculos en las zonas de reducción de las superficies agrícolas obtenidas en las cartografías correspondientes al periodo de cada DoD, ya que los cambios volumétricos que se produzcan en los montes que rodean la cuenca carecen de importancia para el objeto del presente estudio. Por otro lado, los cambios volumétricos observados para el periodo entre 2010 y 2020 son menos significativas, pero se solapan con las observadas en el primero, permitiendo confirmar una evolución continua de los procesos de erosión el área de estudio.

En todo caso, el estudio volumétrico se centra en las pérdidas de la zona central del valle, más concretamente en las superficies

de cambio negativas obtenidas en las cartografías de cambio del estudio planimétrico, por lo que se ha optado por realizar una segmentación de los datos. Con esto se ha obtenido que la pérdida de suelo neta para el periodo entre 1977 y 2010 asciende a $2.143,33 \text{ m}^3$, que sumado a los $467,09 \text{ m}^3$ que se pierden durante el periodo entre 2010 y 2020 hace un total de $2.610,42 \text{ m}^3$ de suelo perdido entre 1977 y 2020 tan solo en las zonas donde se ha producido una pérdida de superficie agrícola. Con estos resultados se puede obtener una tasa de pérdida de suelo anual aproximada para cada periodo: $66 \text{ m}^3/\text{año}$ para 1977-2010 y $38 \text{ m}^3/\text{año}$ para 2010-2020, observándose una disminución de la tasa de erosión en la actualidad, lo que podría indicar una aminoración del ritmo de los procesos de erosión.

No cabe duda de que los procesos de erosión han tenido un impacto significativo en los Aguerales de Valpalmas a través de la transformación del paisaje. La expansión del piping por el área de estudio ha provocado cambios tanto a nivel planimétrico como volumétrico, afectando directamente a las actividades humanas que se llevan a cabo en la zona. Mientras que

estos procesos de erosión se han observado activos a lo largo de todo el periodo temporal considerado (1957-2021), cabe destacar que la interpretación de su evolución futura varía respecto al punto de vista planimétrico o volumétrico: la pérdida de extensión de superficies agrícolas parece aumentar ligeramente en las últimas décadas, mientras que la tasa de pérdida de suelo anual es menor en la actualidad que en periodos anteriores. Es probable que esta disminución de las superficies cultivadas se acentúe a medida que el piping se expanda por el área de estudio y los conductos subsuperficiales colapsen creando cavidades en superficie, obligando a los agricultores a adaptarse, lo que supone en la mayoría de los casos a reducir el tamaño de los cultivos. Por otro lado, la progresión de los procesos de erosión a un nivel volumétrico no está tan claro y dependerá en gran medida del tiempo que estas superficies de cultivo aún activas mantengan su actividad (aunque también se ha visto que su abandono puede acentuar la erosión en función de las características del propio campo de cultivo). En todo caso, el nivel de detalle que ofrecen tecnologías como LiDAR permitiría monitorizar el área de estudio e incluso ofrecer la posibilidad de crear modelos que permitiesen predecir (hasta cierto punto) efectos de la erosión.

En definitiva, los procesos de erosión (especialmente el piping) que se desarrollan en los Aguarales de Valpalmas constituyen un riesgo ambiental y socioeconómico que pueden desencadenar diversos efectos sobre el suelo. Las capas más superficiales concentran la mayoría de los nutrientes y su pérdida provoca una disminución notable de la calidad del suelo, disminuyendo su productividad a la vez que deteriora sus propiedades físico-químicas, volviéndolo más vulnerable a la erosión hídrica. Se trata de uno de los primeros signos de desertificación del territorio, un fenómeno común en áreas áridas, semiáridas y sub-

húmedas secas cuyo desarrollo en diferentes partes del territorio español constituye una preocupación cada vez más acuciante. A pesar de los grandes avances científicos realizados en las últimas décadas y las propuestas de instrumentos de ordenación como el Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME) o el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), autores como Reynolds et al. (2005) consideran que los distintos programas que se han puesto en marcha para combatirla son, en general, insuficientes y es necesaria una mayor implicación por parte de las administraciones por continuar su estudio y desarrollar estrategias adaptadas.

Agradecimientos

Los resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo resultan de un Trabajo de Fin de Máster en Ordenación Territorial y Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza realizado en régimen de estancia en el Instituto Pirenaico de Ecología. Agradezco a mi tutor de prácticas Manel Llena por toda su ayuda a lo largo de cada etapa del trabajo y a Estela Nadal por proponerme la estancia en primer lugar, así como por su asesoramiento y apoyo. Destaco la labor de los investigadores José María García y Teodoro Lasanta, cuya vasta labor investigadora ha sido decisiva para la redacción de muchos de los párrafos que aquí se recogen, así como por su implicación directa en las jornadas de campo y en la búsqueda de material bibliográfico más adecuado. También quiero destacar la labor de mis directores Alfredo Ollero y Daniel Ballarín por su guía e implicación en la redacción y revisión del trabajo, asesorándome en los diferentes aspectos técnicos y formales, así como a mi coordinador Carlos López por su asesoría en las etapas iniciales de este TFM.

6. Bibliografía

- Alonso Sarría, F., Martínez Hernández, C., Belmonte Serrato, F. & Fernández Carrillo, M.A. (2016a). Principales causas del abandono de cultivos en la Región de Murcia en Romero Díaz (Ed.), *Abandono de cultivos en la Región de Murcia. Consecuencias Ecogeomorfológicas* (pp. 203-226). Servicio de publicaciones de la Universidad de Murcia.
- Bernatek-Jakiel, A. & Kondracka, M. (2016). Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. *Geomorphology*, 274, 193-209. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.018>.
- Bernatek-Jakiel, A. & Poesen, J. (2018). Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107-1128. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>.
- Bryan, R.B. & Jones, J.A.A. (1997). The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology*, 20 (3-4), 209-218. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00024-X).
- Faulkner, H. (2013). Badlands in marl lithologies: a field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*, 106, 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.005>.
- Ferrer, V. (2016). *Estudio geomorfológico en los badlands de los Aguarales de Valpalmas (Zaragoza) mediante la aplicación de nuevas tecnologías*. Trabajo de Fin de Máster de la Universidad de Zaragoza.
- Ferrer, V., Errea, P., Alonso, E., Nadal-Romero, E. & Gómez-Gutiérrez, Á. (2017). A multiscale approach to assess geomorphological processes in a semiarid badland area (Ebro Depression, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43 (1), 41-62. <https://doi.org/10.18172/cig.3139>.
- Fister, W. & Ries, J.B. (2009). Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel. *Journal of Arid Environments*, 73, 996-1004. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.05.006>.
- García-Ruiz, J.M. & López-Bermúdez, F. (2009). *La erosión del suelo en España*. Sociedad Española de Geomorfología.
- Gutiérrez, M., Sancho, C., Benito, G., Sirvent & J., Desir, G. (1997). Quantitative study of piping in badlands areas of the Ebro basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20, 237-253.
- Harvey, A. (2004). Badland en Fairbridge, R.W. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge.
- Keesstra, S., Sannigrahi, S., López-Vicente, M., Pulido, M., Novara, A., Visser, S. & Kalantari, Z. (2021). The role of foils in regulation and provision of blue and green water. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 376 (1834), 20200175. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0175>.
- Koppitke, P.M., Menzies, N.W., Wang, P., McKenna, B.A. & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.
- Lasanta, T. (1996). El proceso de marginación de tierras en España en T. Lasanta, J.M. García-Ruiz (Eds.), *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*. Instituto de Estudios Riojanos – Sociedad Española de Geomorfología.
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Khorchani, M. & Romero-Díaz, A. (2021). Una revisión sobre las tierras abandonadas en España: de los paisajes locales a las estrategias globales de gestión. *Cuadernos de Investigación Científica*, 47, 477-521.
- Lesschen, J.P., Kok, K., Verburg, P.H. & Cammeraat, L.H. (2007). Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain. *Catena*, 71, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.014>.
- Llena, M., Vericat, D. & Martínez-Casnovas, J.A. (2018). Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial. *Cuaternario y Geomorfología*, 32, 53-73.
- López-Bermúdez, F. (2002). Erosión y desertificación: heridas en la Tierra. *Nivola*.
- Molina, C.M. (2002). Estrategia forestal comunitaria, nacional y autonómica. *Ería*, 58, 177-181.

- Moreno-de las Heras, M. & Gallart, F. (2018). The Origin of Badlands. *Badlands Dynamics in the Context of Global Change*, Chapter 2. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00002-2>.
- Parker, G., Higgins, C. (1990). Piping and pseudokarst in drylands en Higgins, C. & Coates, D. (Eds.), *Groundwater Geomorphology. The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes*. John Wiley & Sons.
- Reynolds, J.F., Maestre, F.T., Huber-Sannwald, E., Herrick, J. & Kemp, P.R. (2005). Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. *Ecosistemas*, 14 (3), 3-21.
- Richards, K.S. & Reddy, K.R. (2007) Critical appraisal of piping phenomena in Earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 381-402. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0095-0>.
- Romero-Díaz, A., Marín-Sanleandro, P., Sánchez-Soriano, A., Belmonte-Serrato, F. & Faulkner, H. (2007). The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in Southeast Spain. *Catena*, 69, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.008>.
- Ruiz-Flaño, P. (1993). Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo. *Geoforma*.
- Ternan, J.L., Elmes, A., Fitzjohn, C. & Williams, A.G. (1998). Piping susceptibility and the role of hydrogeomorphic controls in pipe development in alluvial sediments, Central Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42 (1), 75-87.
- Tóth, G., Gardi, C., Bódis, K., Ivits, É., Aksoy, E., Jones, A. et al. (2013). Continental-scale assessment of provisioning soil functions in Europe. *Ecological Processes*, 2, 32. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-32>.
- Urteaga, L. (1987). La Tierra esquilada: las ideas sobre la conservación de la naturaleza en la cultura española del siglo XVIII. *Ediciones Serbal y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*, 221 pp.
- Wilson, G.V. & Fox, G.A. (2013) Pore-water pressures associated with clogging of soil pipes: numerical analysis of laboratory experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 77(4), 1168-1181. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0416>.
- Wilson, G.V., Wells, R.R., Kuhnle, R.A., Fox, G.A. & Nieber, J. (2017a). Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 45-63. <https://doi.org/10.1002/esp.4147>.
- Wilson, G.V., Wells, R.R., Kuhnle, R.A., Fox, G.A. & Nieber, J. (2018) Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 45-63. <https://doi.org/10.1002/esp.4147>.