

PROCESOS HIDROLÓGICOS Y EROSIVOS DE UN EVENTO TORMENTOSO EXTREMO EN UNA ESTEPA DE ALMENDROS DEL SURESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

CARLOS MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ¹ 

MIGUEL ANGEL LÓPEZ SANDOVAL¹ 

NÚRIA TORRENTE GARCÍA² 

MARTÍN LÓPEZ SANDOVAL³ 

RESUMEN – Se presenta un estudio cuantitativo de los efectos hidrológicos y erosivos de un evento tormentoso extremo (62mm en una hora) en una estepa de almendros de secano en la cuenca del Barranco de la Casa de la Parra (sureste de la Península Ibérica). Tras caracterizar la cuenca de drenaje, se expone la situación sinóptica. Para la cuantificación hidrológica se ha recurrido al método racional según la Norma 5.2-IC del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, para un periodo de retorno de 25 años. La dinámica erosiva, se ha cuantificado a través de mediciones de campo, de una gran cárcava originada por los procesos hidrológicos. Los resultados consisten en una serie de variables hidrológicas que caracterizan la avenida producida, así como en la estimación de la pérdida de suelo consecuente, tanto en volumen como en peso. Estos resultados, entre los cuales se puede destacar un caudal punta de $18\text{m}^3/\text{s}$ capaz de excavar 1741m^3 de materiales, se interpretan como consecuencia del tipo de suelo (cuenca sedimentaria) y del uso mayoritario actual (cultivo de almendros), que desprotege el suelo más y durante más tiempo que los usos tradicionales (monte bajo y un cultivo más extenso de cereal). Se concluye llamando la atención de la aparente poca sensibilidad actual del sector agrario ante los procesos erosivos extremos, que parece que son, al amparo de los resultados y la literatura científica, los que más intensamente reconfiguran el paisaje cuando existe desequilibrio agrario-natural.

Palabras-clave: Sureste de la Península Ibérica; avenida; erosión; cárcava; almendros.

Recibido: setiembre 2019. Aceite: marzo 2021.

¹ Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales, Sociales y Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid, Calle Rector Royo Villanova, s/n, 28040, Madrid, España. E-mail: cmartinezhernandez@ucm.es

² Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología, Universidad de Murcia, Murcia, España. E-mail: nuria.torrenteg@um.es

³ Dirección General del Medio Natural, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Oficina de Impulso Socioeconómico del Medio Ambiente, Murcia, España. E-mail: martin.lopez@carm.es

RESUMO – PROCESSOS HIDROLÓGICOS E EROSIVOS DE UM EVENTO TEMPESTUOSO EXTREMO NUMA ESTEPE DE AMENDOEIRAS NO SUDESTE DA PENÍNSULA IBÉRICA. Esta investigação apresenta um estudo quantitativo dos efeitos hidrológicos e erosivos de um evento tempestuoso extremo (62mm numa hora) numa estepe de amendoeiras de sequeiro na bacia de Barranco da Casa de la Parra (sudeste da Península Ibérica). Após caracterizar a bacia de drenagem, é exposta a situação sinótica. Para a quantificação hidrológica, o método racional foi utilizado de acordo com a Norma 5.2-IC do Ministério do Desenvolvimento do Governo da Espanha, por um período de retorno de 25 anos. A dinâmica erosiva foi quantificada através de medições de campo de uma grande ravina causada por processos hidrológicos. Os resultados consistem numa série de variáveis hidrológicas que caracterizam o episódio de escoamento, bem como na estimativa da consequente perda de solo, tanto em volume quanto em peso. Esses resultados, entre os quais se destaca um pico de fluxo de $18\text{m}^3/\text{s}$ capaz de escavar 1741m^3 de materiais, são interpretados como consequência do tipo de solo (bacia sedimentar) e do uso predominante atual (cultivo de amendoeiras), que desprotege o solo mais e por mais tempo do que os usos tradicionais (monte baixo e cultivo de cereais mais extenso). Conclui-se chamando a atenção para a aparente baixa sensibilidade atual do setor agrícola para processos erosivos extremos, o que parece ser confirmado pelos resultados e pela literatura científica, que reconfiguram mais intensamente a paisagem quando existe desequilíbrio agrário-natural.

Palavras-chave: Sudeste da Península Ibérica; escoamento; erosão; ravina; amendoeiras.

ABSTRACT – HYDROLOGICAL AND EROSIVE PROCESSES OF AN EXTREME STORMY EVENT IN AN ALMOND TREE STEPPE SETTING IN THE IBERIAN PENINSULA SOUTHEAST. This research offers a quantitative study of the hydrological and erosive effects of an extreme stormy event (62mm in one hour) in Barranco de la Casa de la Parra basin, an almond tree steppe. The drainage basin and the synoptic situation are characterized. For hydrological quantification, the rational method has been used according to Standard 5.2-IC of the Ministry of Development (Government of Spain), for a return period of 25 years. The erosive dynamics have been quantified through field measurements of a large gully originated by hydrological processes. The results consist of the measurement of hydrological variables that characterize the flash flood, as well as the estimate consequent loss of soil, both in volume and weight. We highlight a peak flow rate of $18\text{m}^3/\text{s}$ able to excavate 1741m^3 of materials. The results are interpreted as being a consequence of the type of soil (sedimentary basin) and the current main land use (almond trees), which unprotects the soil more and longer than the traditional uses (scrubland and a larger surface of cereals). It concludes by drawing attention to the apparent low sensitivity of the agrarian sector towards extreme erosion processes, which seem to be, in accordance with these results and with scientific literature, those that most intensely reconfigure the landscape in a scenario of agro-natural imbalance.

Keywords: Southeast of the Iberian Peninsula; flash flood; erosion; gully; almond trees.

RÉSUMÉ – PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET ÉROSIFS D'UN ÉVÉNEMENT DE TEMPÊTE EXTRÊME DANS UNE STEPPE D'AMANDIERS DU SUD-EST DE LA PÉNINSULE IBÉRIQUE. Les effets hydrologiques et érosifs d'un événement de tempête

extrême (62mm en une heure) sont étudiés quantitativement dans une steppe d'amandiers dans le bassin Barranco de la Casa de la Parra, (sud-est de la Péninsule Ibérique). Après une caractérisation du bassin de drainage, la situation synoptique est exposée. Pour la quantification hydrologique, la méthode rationnelle a été utilisée conformément à la norme 5.2-IC du Ministère du Développement du Gouvernement de l'Espagne, pour une période de retour de 25 ans. La dynamique érosive a été quantifiée par des mesures sur le terrain d'un grand ravin causé par des processus hydrologiques. Les résultats montrent une série de variables hydrologiques qui caractérisent l'inondation, ainsi que l'estimation de la perte de sol qui en résulte, à la fois en volume et en poids. Ces résultats, parmi lesquels il peut être mis en évidence un débit de pointe de $18\text{m}^3/\text{s}$ capable d'extraire 1741m^3 de matériaux, sont interprétés comme une conséquence du type de sol (bassin sédimentaire) et de l'usage majoritaire actuel (cultures d'amandiers) qui rend ce sol plus et pendant plus longtemps vulnérable à l'érosion vis-à-vis des usages plus traditionnels (fourré et la culture céréalière plus étendue). L'étude conclut en attirant l'attention sur la faible sensibilité apparente du secteur agricole aux processus érosifs extrêmes, qui semblent être, en vertu des résultats et de la littérature scientifique, ceux qui reconfigurent le plus intensément le paysage quand il y a un déséquilibre agraire-naturel.

Mot clés: sud-est de la Péninsule Ibérique; inondation; érosion; ravine; amandiers.

I. INTRODUCCIÓN

La configuración geomorfológica de un territorio depende de una gran multitud de factores, que actúan dinámicamente a muy distintas escalas temporales y de intensidad. Numerosos autores han demostrado que eventos tormentosos extremos pueden modificar considerablemente el paisaje a través de procesos hidrológicos y erosivos de alta intensidad concentrada en poco espacio de tiempo (Gajic *et al.*, 2018; Lou *et al.*, 2019; Maidment, 1993; Zhong *et al.*, 2018), lo que parece más evidente en cuencas sedimentarias neógenas, de materiales blandos (Wang *et al.*, 2018), especialmente en ambientes semiáridos (Luna *et al.*, 2018; Mamede *et al.*, 2018; Millares *et al.*, 2019).

Estas cuencas suelen estar caracterizadas por una red de drenaje de caudales intermitentes, canalizados por ramblas y torrentes que, ante la caída de una fuerte y corta precipitación, a modo de lluvia torrencial, pueden llegar a arrastrar volúmenes muy elevados de agua y sedimentos. Esta enorme fuerza erosiva genera cantidades ingentes de pérdida de suelo y moldea, de una forma muy espectacular, el paisaje de toda la cuenca, desde el punto de origen hasta el punto de deposición de materiales (Solé Benet *et al.*, 2009).

A lo largo de todo el ámbito mediterráneo, diversas experiencias han permitido cuantificar la potencia de pérdidas de suelo debidas a estos eventos tormentosos extremos. En áreas margosas del sur de Europa, con una larga historia de uso de la tierra, se producen enormes tasas de erosión del suelo que Faust & Schmidt (2009) cifran en hasta $120\text{Ton}/\text{ha}$ en parcelas de campo de 1000m^2 por cada tormenta de lluvia de gran intensidad. En una parcela catalana de viñedos, Martínez-Casasnovas *et al.* (2002) miden, para

un evento lluvioso de unos 200mm en 2 horas, una pérdida de suelo de 828m³, con un índice de erosividad (R) muy alto: 11 756 MJ/ha/mm/h. En la cuenca del Segura, donde se inserta el área de estudio, López-Bermúdez (1973) ya midió tasas de erosión de 232Ton/km²/año. Thornes (1976) estimó valores superiores al este de Andalucía (entre 400 y 500Ton/km²/año). Fernández Carrillo (2015) habla de “pérdidas de suelo fértil muy cuantiosas, afectando a ecosistemas en regiones como el sureste de España caracterizadas por frecuentes episodios de torrencialidad”. Recientemente, Romero Díaz *et al.* (2009) confirman estos valores altos de pérdida de suelo, estableciendo resultados de más de 200 Ton/ha/año en el sureste de España.

Los procesos hidrológicos y erosivos pueden verse incrementados en función del uso que se haga del suelo (Brandt & Thornes, 1996). Tal como afirman Panagos *et al.* (2017), “los patrones de precipitaciones intensas y violentas influyen en los procesos hidrológicos y erosivos y, como tales, son esenciales para la definición de las prácticas de conservación del suelo y el agua en la adaptación de la agricultura al cambio climático”. Esto adquiere importancia en un contexto actual en Europa en que la Política Agraria Común (PAC) y la mundialización de mercados ha llevado a la extensión de almendros, olivos y viñedos, cultivados con prácticas agrarias intensivas, hacia parcelas en pendiente marginadas e incluso a veces abandonadas previamente, lo que lleva a un aumento de la erosión del suelo, especialmente durante tormentas intensas (García-Ruiz, 2010). Según Yang *et al.* (2003), con el desarrollo de las tierras de cultivo en el último siglo, se estima que el potencial de erosión del suelo ha aumentado en aproximadamente un 17%. Romero Díaz *et al.* (2012) aproximan las pérdidas de suelo en áreas marginales de fuerte pendiente ocupadas por cultivos leñosos en el orden de las 80Ton/ha/año.

En el sureste de la Península Ibérica, las lluvias torrenciales son parte sustancial del clima semiárido de la zona, con sus correspondientes efectos en los procesos de erosión e incluso desertificación (López-Bermúdez, 1990). La distribución e intensidad de la precipitación como consecuencia de la variabilidad climática juega un papel decisivo en los procesos de erosión, transporte y sedimentación del ámbito mediterráneo (Wolf *et al.*, 2013). En este sentido, es significativo el papel que adquiere el cambio climático, cuyo impacto en la erosión del suelo está ampliamente demostrado, sobre todo en suelos degradables y afectados por cambios de uso (De Ploey *et al.*, 1991). Castejón-Porcel *et al.* (2018) analizan para la comarca murciana del Campo de Cartagena una interpolación de las lluvias intensas entre 2012 y 2016 y concluyen que el sistema agrario de la zona se encuentra en riesgo de insostenibilidad. Romero Díaz y Ruiz Sinoga (2016) presentan distintos métodos experimentales de evaluación erosiva en la Región de Murcia que dan como resultado tasas muy elevadas de pérdidas de suelo, asociadas sobre todo al efecto de las lluvias intensas y puntuales. Butzer (2005) testifica, para el ámbito mediterráneo ejemplificando en el este de la Península Ibérica, el impacto de los eventos de lluvia recurrentes e intensos, sobre todo en suelos con menos cobertura, por la intensificación de la agricultura producida en estas zonas.

En este marco científico y ambiental, la aportación que se busca con el presente estudio es el análisis, mediante una cuantificación muy detallada, de los procesos hidrológi-

cos y erosivos que causó, el 2 de junio de 2018, una fuerte tormenta de carácter local (62mm en una hora) en el paraje “Llanos del Cagitán”, en el municipio de Mula (Región de Murcia), con el que poder proporcionar datos concretos de una enorme pérdida de suelo y de una importante reconfiguración del paisaje, a través de una única pero extensa cárcava en la desembocadura de un cauce intermitente. Estos resultados se relacionarán, no solo con el evento tormentoso extremo y la estructura edafológica y geomorfológica de la cuenca, sino también con el uso mayoritario del suelo actual (cultivo de almendros), diferente al tradicional (cultivo masivo de cereal), para intentar responder a la incógnita de si este cambio de uso influye en una mayor incidencia de los fenómenos torrenciales.

Por lo tanto, los objetivos de este estudio son: i) analizar el evento tormentoso extremo del 2 de junio de 2018; ii) reconstruir el comportamiento hidrológico de la cuenca del área de estudio; iii) estimar los materiales erosionados en la cárcava generada; iv) relacionar el comportamiento ambiental con el uso del suelo; y v) reflexionar sobre medidas de prevención y mitigación de la erosión.

II. METODOLOGÍA

1. Área de estudio

El paraje de los Llanos del Gagitán incluye la subcuenca de drenaje estructurada por el Barranco de la Casa de la Parra, de unos 6,5km² en su tramo alto, al sur del Espacio Natural Protegido de la Red Natura 2000 más extenso de la Región de Murcia: “Sierra del Molino, Embalse de Quípar y Llanos del Cagitán” (ES0000265). Ubicado en su mayor parte en el municipio de Mula (Región de Murcia), se trata de un territorio prácticamente llano pero con suaves ondulaciones (siempre con una pendiente inferior al 3%), con una altitud media de 406m, de carácter estepario, donde predominan los cultivos de almendros, cereal, olivos y vid, surcado por unos ramblizos denominados *rameles* que finalmente van a desembocar al propio cauce del río Quípar, en distintas subcuencas por su margen derecha y en las inmediaciones de las colas del Embalse del Quípar o de Alfonso XIII.

Según la clasificación de Köppen (López Gómez & López Gómez, 1959), la zona, correspondiente al piso Mesomediterráneo, presenta un clima “Csa”, esto es, mediterráneo con verano caluroso. Atendiendo a los datos de la estación meteorológica más cercana (*ML21-Mula*, de la red del Sistema de Información Agraria de Murcia [SIAM]), la precipitación anual es de 301mm, concentrándose la mayoría de las lluvias en los equinoccios. La temperatura media es de 18°C, superándose los 25°C de media en el mes más cálido y no bajando de 10°C en el mes más frío.

El paisaje ecológico predominante puede asociarse al de “campiña”. La mayor extensión es ocupada por el cultivo de almendros (*Prunus dulcis*), habiendo superado recientemente a las superficies cerealistas cultivadas. En tercer lugar, dentro de la campiña se sitúan las comunidades vegetales forestales de monte bajo, que salpican y colonizan algunos retazos rocosos ligeramente elevados de esta gran estepa, y que estarían formadas,

por un lado, por pino carrasco (*Pinus halepensis*), y, por otro, por matorrales, como el lentisco (*Pistacia lentiscus*), el chaparro (*Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*) o el espino negro (*Rhamnus lycioides*), y por herbáceas, como el esparto (*Stipa tenacissima*). Le siguen en extensión el cultivo de la vid (*Vitis vinifera*) y del olivo (*Olea europaea*).

Los suelos más predominantes de la cuenca son los Regosoles calcáricos, que se tornan en Xerosoles cálcicos y petrocálcicos hacia los piedemontes (Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente [CARM], 2000). Son suelos de ambientes áridos, poco profundos y escaso desarrollo de raíces, pedregosos, de textura relativamente gruesa y con el complejo saturado. En algunas zonas próximas podemos encontrar en la roca madre entalladuras de hasta 15m, formadas por margas del Mioceno superior y afectadas por procesos muy intensos de sufusión o *piping* (Romero Díaz et al., 2009).

2. Comportamiento hidrológico de la cuenca

El evento tormentoso estudiado, acontecido el 2 de junio de 2018, dejó una precipitación máxima de 62mm en una hora, según una estación meteorológica particular ubicada en la cuenca. Para el análisis del comportamiento hidrológico del Barranco de la Casa de la Parra tras esta intensa precipitación, se ha aplicado el método racional según la Norma 5.2-IC (Ministerio de Fomento, 2016), ajustando las variables al tiempo de retorno de 25 años, tal como establece la Norma para estos datos de precipitación en esta área geográfica. También se recurrirá, cuando la Norma así lo establece, a las formulaciones del SCS (*Soil Conservation Service* de Estados Unidos). Para los cálculos espaciales, finalmente, se han utilizado herramientas SIG.

2.2.1. Corrección de la precipitación diaria

La precipitación diaria debe corregirse para cuencas de más de 1km², como es el caso; se establece un factor reductor para compensar que en grandes cuencas la precipitación puede no ser homogénea en toda su superficie. Este factor reductor (K_A), multiplicado por la precipitación diaria (P_d) para obtener la precipitación diaria corregida ($P_{dc} = P_d \cdot K_A$), es el resultado de la siguiente fórmula (Norma 5.2-IC):

$$K_A = 1 - \frac{\log \text{Superficie (Km}^2\text{)}}{15}$$

2.2.2. Intensidad media diaria

La intensidad media diaria (I_d) es un valor teórico de la distribución horaria (mm/h) de la precipitación diaria corregida (P_{dc}), por lo que se calcula dividiendo esta última por las 24 horas del día (Norma 5.2-IC):

$$I_d = P_{dc}/24$$

2.2.3. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (t_c) puede definirse como el tiempo (horas) que tarda en llegar a la sección de salida de la cuenca, el agua que cae en el punto hidrológicamente más alejado; esto es, el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la superficie de la cuenca de drenaje contribuyan simultáneamente al caudal recibido en la salida. Para calcularlo, hay que relacionar la longitud del cauce principal (L) con su pendiente media (S), en la siguiente fórmula (Norma 5.2-IC):

$$t_c = 0,3 \cdot \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}}$$

Para calcular la pendiente media (S), se puede dividir la diferencia de la cota máxima y mínima del cauce entre el valor de su longitud (Norma 5.2-IC).

2.2.4. Intensidad media en el tiempo de concentración

La intensidad (I) media en un periodo t considerado relaciona la intensidad de una hora (I_1) con la intensidad de un día (I_d). Según la Norma 5.2.-IC (Ministerio de Fomento, 2016), al territorio del área de estudio le corresponde un coeficiente de 11 (la intensidad en la hora más lluviosa es 11 veces mayor que la intensidad media de todo el día). En la fórmula (Norma 5.2-IC) calcularemos la intensidad para el tiempo de concentración, que es el que proporciona un mayor caudal:

$$I_t = I_d \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{3,5287-2,5287 \cdot t^{0,1}} ; I_{tc} = I_d \cdot 11^{3,5287-2,5287 \cdot t_c^{0,1}}$$

2.2.5. Umbral de escorrentía

El umbral de escorrentía (P_o) representa la precipitación mínima que debe caer sobre una cuenca para que se inicie la generación de escorrentía. La Norma 5.2.-IC establece, mediante una tabla, unos valores predeterminados de P_o inicial en función del uso del suelo, la pendiente y el tipo de suelo. Este valor debe ser modificado por un coeficiente corrector (β), que se obtiene de multiplicar el valor correspondiente de la tabla de la Norma para la región de estudio (β_m) con el valor equivalente al tiempo de retorno (F_T). El umbral de escorrentía modificado se calcula, por tanto, aplicando la siguiente fórmula (Norma 5.2-IC):

$$P_o = P_{o_{inicial}} \cdot \beta$$

2.2.6. Coeficiente de escorrentía

Si la precipitación diaria corregida (P_{dc}) no alcanza el umbral de escorrentía (P_o), no fluye el agua procedente de la precipitación neta (P_n) dentro del cauce, y el coeficiente de

escorrentía (C) sería nulo. Sin embargo, Si $P_{dc} > P_o$, hay que aplicar la siguiente fórmula (Norma 5.2-IC):

$$C = \frac{\left(\frac{P_{dc}}{P_o} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_{dc}}{P_o} + 23\right)}{\left(\frac{P_{dc}}{P_o} + 11\right)^2}$$

2.2.7. Coeficiente de Uniformidad Temporal

En cuencas de más de 1km^2 , la intensidad de la precipitación no va a ser homogénea en todos los puntos a lo largo de todo el tiempo de concentración, y por ello se establece un coeficiente de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación (K_t), en relación al tiempo de concentración (t_c) (Norma 5.2-IC):

$$K_t = 1 + \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14}$$

2.2.8. Caudal

El caudal (Q), dado en m^3/s , se calcula en función del coeficiente de escorrentía (C), la intensidad de precipitación en mm/h para un tiempo igual al tiempo de concentración (I_t), el área de la cuenca de drenaje en Km^2 (A), el coeficiente de uniformidad temporal (K_t) y, debido a que las unidades no son unitarias, un dividendo con un valor de 3,6 procedente de los 3600 segundos de una hora (Norma 5.2-IC):

$$Q = \frac{C \cdot I_t \cdot A \cdot K_t}{3,6}$$

2.2.9. Tiempo de retardo

El tiempo de retardo (t_r) se define como el tiempo que transcurre (en horas) desde el centro de gravedad del hietograma de precipitaciones al centro de gravedad del hidrograma de caudales, esto es, desde que se produce el máximo de precipitación hasta que se alcanza el máximo de caudal. Para calcularlo se multiplica el tiempo de concentración de la avenida (t_c) por un valor de 0,6, según el diagrama triangular del *Soil Conservation Service* de Estados Unidos (SCS):

$$t_r = 0,6 \cdot t_c$$

2.2.10. Tiempo del caudal punta

El tiempo del caudal punta (t_p) se define como el tiempo que tarda (en horas) en alcanzarse el máximo caudal de una avenida, medido desde el comienzo de la precipita-

ción neta. Para calcularlo, hay que conocer el tiempo de retardo (t_r), el tiempo de concentración (t_c) y la duración de la precipitación neta (D) (Norma 5.2-IC):

$$t_p = 0,5 \cdot D + t_c$$

2.2.11. Tiempo base de duración de la crecida

El tiempo base de la duración de la crecida (t_b) se define como el sumatorio de dos tiempos: por un lado, el de la Precipitación neta (P_n), entendido como la parte del tiempo de la precipitación total que va a generar escorrentía y aportar completamente al caudal; y, por otro lado, el Tiempo de concentración (t_c), entendido como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la superficie de la cuenca contribuyan simultáneamente al caudal recibido en su salida. Para calcularlo, hay que multiplicar el tiempo del caudal punta (t_p) por un coeficiente de 2,67 (Norma 5.2-IC):

$$t_b = 2,67 \cdot t_p$$

2.2.12. Caudal punta

El caudal punta (Q_p) es el máximo caudal de una avenida, en m^3/s . Para calcularlo, hay que conocer la precipitación neta (P), el área de la cuenca de drenaje en Km^2 (A) y el tiempo base de duración de la crecida (t_b) (Norma 5.2-IC):

$$Q_p = \frac{P \cdot A}{1,8 \cdot t_b}$$

2.2.13. Velocidad del caudal punta

La velocidad del caudal punta ($V(h)$), medida en m/s , tiene en cuenta el coeficiente de rugosidad de Manning (n), la pendiente medida en m/m (S) y el radio hidráulico (Rh), definido como la relación entre el área de la sección del flujo del caudal punta y el *perímetro mojado* (línea de contacto entre esta sección y la base rocosa que conforma la cama por donde discurre el caudal) (Norma 5.2-IC):

$$V(h) = \frac{1}{n} (Rh)^{2/3} \sqrt{S}$$

Para calcular el radio hidráulico se ha hecho trabajo de campo, midiendo el perímetro mojado con una cinta métrica tomando como referencia las marcas de deposición de la crecida a ambos márgenes del cauce desde su desembocadura: 18,5m. Para la sección, se han tomado 36 puntos de medida, uno cada 0,5m a lo largo del cauce, a modo de superficies trapezoidales, para obtener finalmente un valor sumatorio: 8,12m² (cuadro I).

Cuadro I – Valores de la medición de campo para obtener el radio hidráulico del caudal.

Table I – Values from the field work to obtain the hydraulic radius of the flow.

Punto	Distancia margen izquierda (m)	Profundidad (m)	Área sección (m ²)	Punto	Distancia margen izquierda (m)	Profundidad (m)	Área sección (m ²)
0	0,00	0,00	0,00	19	9,50	0,86	0,43
1	0,50	0,09	0,02	20	10,00	0,83	0,42
2	1,00	0,15	0,06	21	10,50	0,83	0,41
3	1,50	0,16	0,08	22	11,00	0,86	0,42
4	2,00	0,19	0,09	23	11,50	0,65	0,38
5	2,50	0,22	0,10	24	12,00	0,58	0,31
6	3,00	0,26	0,12	25	12,50	0,54	0,28
7	3,50	0,28	0,13	26	13,00	0,50	0,26
8	4,00	0,30	0,14	27	13,50	0,39	0,22
9	4,50	0,35	0,16	28	14,00	0,28	0,17
10	5,00	0,41	0,19	29	14,50	0,25	0,13
11	5,50	0,48	0,22	30	15,00	0,24	0,12
12	6,00	0,62	0,27	31	15,50	0,22	0,11
13	6,50	0,69	0,33	32	16,00	0,21	0,11
14	7,00	0,90	0,40	33	16,50	0,16	0,09
15	7,50	0,90	0,45	34	17,00	0,12	0,07
16	8,00	0,91	0,45	35	17,50	0,08	0,05
17	8,50	0,92	0,46	36	18,00	0,00	0,02
18	9,00	0,88	0,45				
				<i>Media</i>	9,00	0,44	
				Total			8,12

2. Dinámica Erosiva

El resultado geomorfológico visible de la avenida fue la constitución de una cárcava de grandes dimensiones en la desembocadura de la cuenca. Esta cárcava es un indicador del volumen de materiales transportados. Para calcularlo, se siguió la siguiente secuencia:

- En primer lugar, se midió la longitud de la cárcava desde su comienzo en la parte superior del cauce hasta su final en la parte inferior, donde comenzaban los depósitos de los volúmenes evacuados (125m);
- En segundo lugar, se hicieron marcas cada cinco metros en el eje longitudinal de la cárcava, para poder obtener una serie de secciones (25) con las que estimar el volumen evacuado durante el evento;
- Cada una de estas 25 secciones fue geometrizada a modo de superficies trapezoidales, midiendo la anchura de la base del canal y la altura de cada margen, para luego poder aplicar el área del trapecio;
- Posteriormente se multiplicó cada área por los cinco metros de separación entre una sección y otra, y después se estableció un sumatorio entre todos los valores, obteniendo un valor que se corresponde con el total de volumen evacuado, a lo largo de los 125m de la cárcava;
- A continuación, de este volumen total, se estimó de forma aproximada, con observación de campo, el porcentaje de suelo y de roca madre que habían sido evacuados;

- Para cuantificar el peso de suelo y el de roca madre evacuados de la cárcava, se calculó la densidad de una muestra de cada uno en varios puntos, relacionando masa y volumen de esta. Estos datos hay que tomarlos con cautela por una representatividad limitada por falta de réplicas;
- Finalmente, estos valores de densidad fueron multiplicados por sus correspondientes volúmenes, para obtener así un valor de peso específico para cada uno de los materiales evacuados durante el evento.

Por último, para estimar la capacidad erosiva de la corriente en su desembocadura y analizar en qué intensidad influye en la formación de la cárcava, se ha calculado el Índice de Potencia de la Corriente (SPI, *Stream Power Index*), a partir de valores de superficie y pendientes extraídos de herramientas SIG desde un MDE de 25m de resolución. El SPI es una medida del poder erosivo del flujo de agua, de forma que cuanto más alto sea su valor más potencialidad erosiva indica (Seutloali *et al.*, 2017), y se calcula como el logaritmo neperiano del producto del área específica de la cuenca contribuyente (A_s) y la tangente del desnivel en grados ($\tan(\beta)$) (Moore *et al.*, 1993):

$$SPI = \ln (A_s \cdot \tan \beta)$$

III. RESULTADOS

1. Caracterización del fenómeno tormentoso

Durante la jornada del 2 de junio de 2018, se formaron un conjunto de tormentas en la parte centro y norte de la Región de Murcia y en gran parte del SE peninsular, distribuidas de una manera irregular, como consecuencia de la entrada de una masa de aire muy cálida y húmeda, casi subtropical, desde el Mediterráneo, al mismo tiempo de la llegada de aire frío en altura, provocando una situación de total inestabilidad atmosférica (fig. 1).

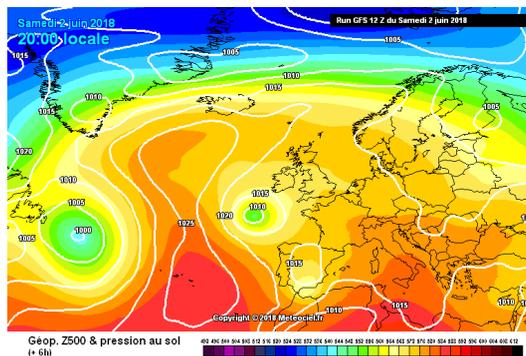


Fig. 1 – Situación sinóptica del sábado, 2 de junio de 2018, según el modelo francés GFS.

Figura en color disponible en línea.

Fig. 1 – Synoptic situation on Saturday, 2nd of June 2018, according to GFS French model.
Colour figure available online.

Fuente: metociel.fr

En los Llanos del Cagitan se desarrollaron muy rápidamente grandes cumulonimbos, debido a procesos convectivos intensos por el calentamiento de aire en superficie, que genera movimientos verticales en la nube que aceleran la convección en procesos de conducción de calor en sentido vertical hacia la atmósfera (Cuadrat & Pita, 2006). El resultado fue un evento tormentoso de carácter torrencial con un total de 62mm de precipitación en una sola hora, tal como recogió un pluviómetro particular instalado en una vivienda de labranza de la zona y siendo esta la única precipitación del día. Las precipitaciones del mes de junio fueron en todo el sureste español mucho más abundantes respecto al valor normal mensual (fig. 2), gracias sobre todo a la tormenta estática del día 2, que en algunos puntos llegó a dejar más de 100mm de lluvia.

2. Cálculos del caudal de crecida

Para poder aplicar todas las fórmulas hidrológicas, necesitamos de datos previos de caracterización de la cuenca, desde una perspectiva natural (cuadro II) y de aprovechamiento humano (cuadro III).

Cuadro II – Valores ambientales de la cuenca de drenaje.

Table II – Environmental values of water basin.

Parámetro geomorfológico	Valor
Longitud del cauce	8,64km
Superficie de la cuenca	6,36km ²
Pendiente del cauce	0,016m/m
Perímetro mojado del cauce	18,50m
Sección del flujo del caudal punta	8,12m ²
Precipitación diaria	62mm

Cuadro III – Parámetros hidrológicamente relevantes relacionados con los tipos de usos del suelo de la cuenca de estudio (Norma 5.2-IC).

Table III – Hydrologically-relevant parameters pertaining to the land use classes in the basin studied (Norma 5.2-IC).

Uso del suelo	Extensión (%)	Pendiente (%)	Suelo (infiltración)	Precipitación (mm)
Tierras de labor en secano (cereales)	60	<3	D	12
Olivares	15	<3	D	14
Frutales en secano (almendros)	15	<3	D	14
Viñedos	5	<3	D	14
Tierras abandonadas	5	<3	D	8

Tal como se puede apreciar en los parámetros hidrológicos del cuadro IV, el caudal medio se ha calculado en 4,79m³/s, un valor considerable para un cauce seco la mayor parte del año, pero más considerable aún es el caudal punta, estimado en 17,96m³/s, con

una velocidad de 3,24m/s. El tiempo de retardo es de solo 2 horas, por lo que el umbral de escorrentía se alcanza ya con 26,25mm. Se trata de una avenida de una enorme caudalosisidad y fuerza, que inevitablemente genera procesos erosivos de una gran violencia.

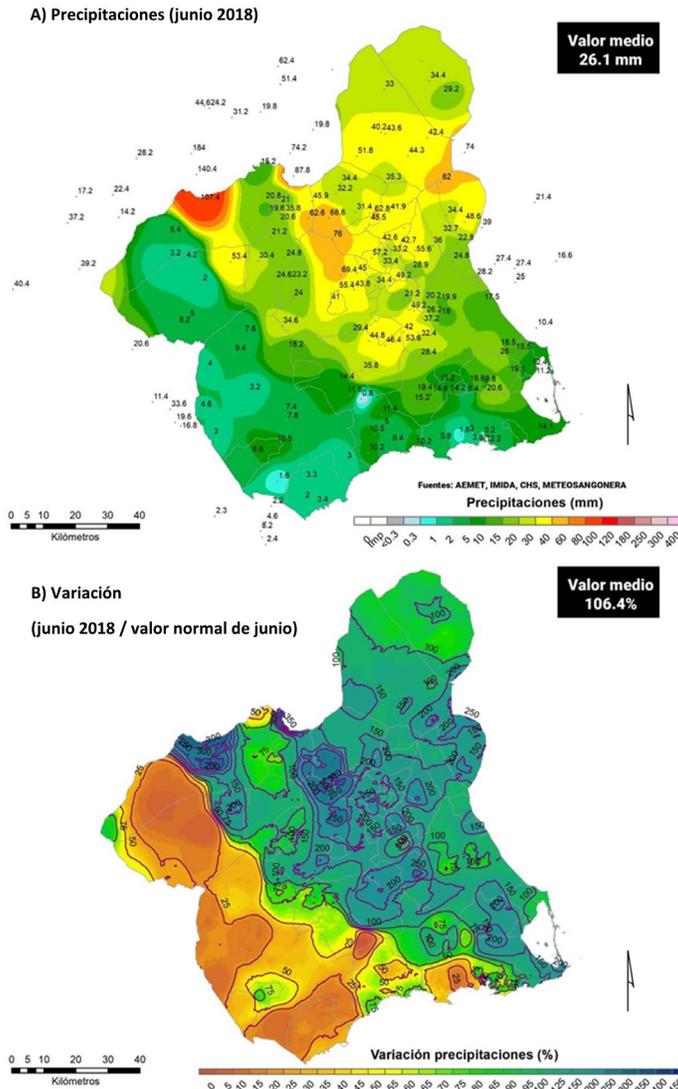


Fig. 2 – Precipitaciones de junio de 2018 en la Región de Murcia (sureste de España): (A) valores totales y (B) porcentaje de variación respecto al valor normal de junio. Figura en color disponible en línea.

Fig. 2 – Precipitations of June 2018 in the Region of Murcia (Southeast Spain): (A) total values and (B) percentage of variation according to the normal value of June. Colour figure available online.

Fuente: AEMET; IMIDA; CHS (<https://www.meteosangonera.es/>)

Cuadro IV – Resultados de las fórmulas y variables hidráulicas.

Table IV – Formulas and hydraulic variables results.

Parámetro hidrológico	Abreviatura	Valor
Precipitación diaria corregida	P_{dc}	58,65mm
Intensidad media diaria	I_d	2,44mm/h
Tiempo de concentración	t_c	3,39h
Intensidad media en el tiempo de concentración	I_{tc}	12,22mm/h
Umbral de escorrentía	P_o	26,25mm
Coefficiente de escorrentía	C	0,18
Coefficiente de uniformidad temporal	K_t	1,25
Caudal medio	Q	4,79m ³ /s
Tiempo de retardo	t_r	2,03h
Tiempo del caudal punta	t_p	2,31h
Tiempo base de duración de la crecida	t_b	6,39h
Caudal punta	Q_p	17,96m ³ /s
Velocidad del caudal punta	$V(h)$	3,24m/s

3. Estimación de la erosión

La crecida del Barranco de la Casa de la Parra excavó, de forma repentina y sin que se apreciaran otras huellas visibles de erosión, en su salida hacia otra subcuenca contigua, una enorme cárcava, de 125m de longitud desde la cabecera hasta el cono aluvial que generó (fig. 3), con un volumen estimado de suelo perdido de 1 740,97m³, un valor extremadamente alto, sobre todo si tenemos en cuenta que es consecuencia de un fenómeno hidrológico puntual. La relación entre este fenómeno y la formación de la cárcava queda en evidencia ante la enorme capacidad erosiva del caudal en su desembocadura, que según el SPI alcanza un valor de 8,02.

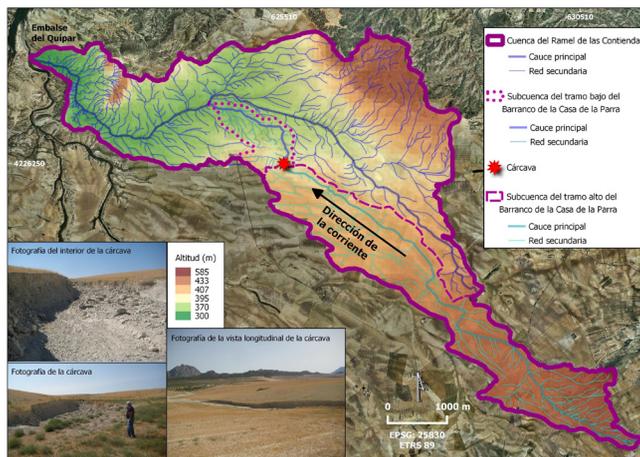


Fig. 3 – Localización y fotografías de la cárcava (nótese sus grandes dimensiones recurriendo a la escala corporal humana y su ubicación entre dos subcuencas). Figura en color disponible en línea.

Fig. 3 – Location and photographs of the gully (we can see its large size by comparing it with a human body scale and its position between two sub-basins). Colour figure available online.

La cárcava llega a presentar valores de anchura de unos 12m en algunos puntos, e incluso profundidades que superan los 2m. La media de longitud entre una margen y la otra es de 7,7m, siendo la margen derecha casi el doble de alta que la izquierda: 1,9 frente a 1m (cuadro V).

Cuadro V – Mediciones de campo para obtener el volumen total de la cárcava (longitud de cada sección: 5m).

Table V – Field work measurements employed to estimate the total volume of the gully (length of each section: 5m).

Punto	Anchura (m)	Altura derecha (m)	Altura izquierda (m)	Área sección (m)	Volumen de sección (m ³)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	3,20	0,75	0,30	1,68	4,20
2	4,30	0,50	0,50	2,15	9,57
3	7,10	1,25	1,00	7,99	25,34
4	7,50	1,60	1,30	10,87	47,16
5	7,10	2,10	1,60	13,13	60,02
6	9,00	2,30	1,80	18,45	78,96
7	7,60	3,00	2,10	19,38	94,57
8	9,50	3,70	1,60	25,17	111,39
9	12,10	3,90	1,80	34,48	149,15
10	12,00	4,00	1,70	34,20	171,71
11	12,00	3,60	1,50	30,60	162,00
12	11,90	2,90	1,60	26,77	143,44
13	10,90	2,90	1,35	23,16	124,84
14	8,40	2,40	1,30	15,54	96,76
15	7,70	2,00	1,10	11,93	68,69
16	6,70	1,50	1,20	9,04	52,45
17	5,60	1,60	1,30	8,12	42,91
18	7,50	1,50	1,20	10,12	45,61
19	8,50	1,50	0,60	8,92	47,62
20	9,00	1,60	0,50	9,45	45,94
21	9,70	1,70	0,50	10,67	50,30
22	6,70	1,80	0,60	8,04	46,77
23	5,20	1,50	0,50	5,20	33,10
24	4,20	0,65	0,45	2,31	18,77
25	7,80	0,20	0,20	1,56	9,67
<i>Media</i>	7,74	1,94	1,06	-	
Total					1740,97

De todo este volumen de material erosionado, la relación suelo-roca es de 40-60%, por lo que tenemos como resultado un montante de suelo útil evacuado de 696,39m³ y de 1 044,58m³ de roca madre. Este suelo (Xerosol cálcico mayoritariamente), presenta una densidad de 1,47g/cm³, o lo que es lo mismo, 1,47T/m³, por lo que el peso del volumen evacuado es de 1 025,78 toneladas (producto del volumen por la densidad). En cuanto a la roca madre (margas del Mioceno superior), el peso es aún mayor; siendo su densidad de 1,81g/cm³, el total erosionado presenta un peso de 1 889,64 toneladas. De estos datos

se puede concluir que todo el material evacuado por un solo evento tormentoso, a raíz de una crecida con un caudal pico de $17,96\text{m}^3/\text{s}$, alcanza un peso total de 2 915,42 toneladas, un valor tremendamente elevado.

IV. DISCUSIÓN

Los eventos tormentosos caracterizados por lluvias torrenciales, de alta pluviosidad en poco tiempo y en espacios reducidos, son capaces de generar unos abundantes caudales ($18\text{m}^3/\text{s}$ de caudal punta, en este caso), lo que conduce a una enorme capacidad de excavar y transportar gran cantidad de materiales deleznable, alcanzando valores de pérdidas de suelo correspondientes a intensos fenómenos erosivos (aquí, 1741m^3).

Se trata de un valor muy alto, correspondiente a casi 3000 toneladas de material excavado y similar a los de otros eventos intensos. Por ejemplo, para campos abandonados en el mismo ámbito territorial y litológico, Martínez-Hernández (2017) calcula tasas de erosión de entre 300 y $3000\text{T}/\text{Ha}/\text{año}$, similares a los valores de Sánchez Soriano (2012) sobre valores de erosión debidos a procesos de *piping*. Faulkner *et al.* (2003) también hablan de acaravamientos producidos sobre margas por eventos meteorológicos extremos y ruptura de pendientes, con enormes pérdidas de suelo. La pérdida de suelo en el área de estudio se sitúa incluso por encima de la media que García-Ruiz y López Bermúdez (2009) establecen para las áreas de *piping* en España ($550\text{T}/\text{ha}/\text{año}$). Del mismo modo, también existen áreas donde la erosión por eventos intensos es aún mayor. Martínez-Hernández (2017), por ejemplo, llega a cuantificar pérdidas de suelo en cárcavas de campos abandonados en hasta $3\ 000\ 000\text{m}^3$ en casos extremos.

Tal como demuestran autores como Martínez-Hernández *et al.* (2017), Khaledian *et al.* (2016) o Kosmas *et al.* (1997), el uso del suelo influye considerablemente en la erosión, más si cabe en eventos torrenciales. En este caso parece muy evidente que el alto porcentaje de suelo desnudo deja muy desprotegida la cuenca, desprovista mayoritariamente de vegetación natural que pueda interceptar la lluvia y mitigar el efecto de la avenida. La mayor parte del suelo está en cultivo, concretamente de almendros y cereal, en secano, por lo que el suelo permanece desnudo o casi desnudo durante meses (Fernández Lorenzo *et al.*, 2017). La protección edáfica es muy reducida porque los marcos de plantación de los almendros son muy amplios, en ocasiones por encima de 8×8 metros, y hasta que los almendros no alcanzan los siete u ocho años de edad no tienen la frondosidad suficiente como para proteger el suelo de la interceptación de las lluvias de una manera adecuada (Durán Zuazo *et al.*, 2012), e, incluso así, la superficie que queda expuesta entre ellos sigue siendo demasiado amplia, por lo que siempre dejan al suelo expuesto directamente a la erosión hídrica. Los cultivos de almendros con numerosos tocones y sin una vegetación agrícola menor bajo los mismos que pueda actuar de sotobosque para proteger el suelo frente a las lluvias torrenciales constituyen un escenario de alta erodibilidad y, al final, de riesgo de desertificación (López Bermúdez, 2006).

Sin embargo, en el sur de Europa las políticas públicas están fomentando en los últimos años las grandes explotaciones de cultivos arbóreos de secano, muchas veces en modalidad ecológica, sin tener en cuenta las posibles consecuencias perjudiciales en cuanto a conservación de suelos (Romero Díaz *et al.*, 2012), por la desprotección a la que dan lugar frente a las fuertes escorrentías que de manera frecuente se producen año a año debido a eventos tormentosos de alta intensidad horaria.

En cuanto a las parcelas cerealistas tradicionales, que, aunque reducidas por la expansión del almendro, aún ocupan grandes espacios, solo son capaces de proteger el suelo mientras están creciendo las espigas y cuando estas tienen un tamaño aceptable (Li *et al.*, 2007). Cuando el suelo está cubierto por rastrojos, tras la siega, y hasta que se vuelve a labrar y sembrar, el suelo está medianamente protegido, pues los rastrojos suelen proporcionar una cubierta a la interceptación medianamente aceptable, pero esto ocurre tan solo unos pocos meses al año, pues la mayor parte del tiempo estas parcelas se encuentran, bien labradas, o bien con un tamaño pequeño de cereal, y la protección es mucho más reducida frente a la interceptación de las lluvias torrenciales (Belmonte Serrato & Romero Díaz, 2013).

En el caso de estudio, la desprotección del suelo facilita que en la conexión entre la subcuenca de estudio y otra contigua, donde la potencialidad erosiva de la corriente es muy alta (SPI=8,02), al producirse una crecida del caudal, se genere una incisión con un proceso de erosión remontante y se forme una cárcava de grandes dimensiones. Con frecuencia, la erosión remontante se produce tras un cambio en el nivel de base, de forma que el cauce, tal como explican Casali *et al.* (2009), alcanza un nuevo nivel de base más estable energéticamente, pero no parece ser el caso, al no observarse una clara ruptura de pendiente hacia la subcuenca contigua. La generación de cárcavas asociadas a la crecida de ramblas en ambientes semiáridos ha sido constatada con frecuencia (Beven, 2002; Parsons *et al.*, 1999; Poesen *et al.*, 2003), muchas veces coincidiendo con las áreas de drenaje de las cuencas, facilitando una erosión remontante (Leopold *et al.*, 1964) como en el caso de estudio, con o sin ruptura de pendiente. También se ha demostrado la relación entre localización de cárcavas y valores altos del SPI; Kakembo *et al.* (2009), por ejemplo, prueban estadísticamente la coincidencia en lugares semiáridos entre la formación de cárcavas y áreas con un valor de SPI entre seis y ocho, rango en el que se sitúa el valor de este índice en la localización de la cárcava de estudio.

Cerca del área de estudio se han localizado procesos de *piping* y acarcamamiento (Romero Díaz *et al.*, 2009), pero en el entorno cercano de la cárcava de estudio no había ninguna evidencia de erosión previa, de ninguna intensidad. Esta cárcava apareció de forma repentina, coincidiendo con un evento tormentoso excepcional. Según se deduce de la literatura científica previamente citada y del estudio hidrogeomorfológico realizado, parece que la erodibilidad del suelo (margas), la alta potencialidad erosiva del cauce en su desembocadura (SPI cercano a ocho), su crecida extraordinaria acumulada en el desagüe de la cuenca (caudal punta de 18m³/s) y una incisión remontante desde la subcuenca contigua son los principales factores que explican la generación de esta cárcava y su localización en el punto final de la corriente.

De todos estos factores, solo el de la crecida producida por la tormenta es de carácter coyuntural, lo que justifica la idea de que los eventos tormentosos extremos son la causa inicial de importantes transformaciones del paisaje. Según De Alba *et al.* (1998), la erosión del suelo se limita a muy pocos episodios de lluvia, de tal forma que el 87% de las pérdidas por erosión se corresponden con eventos extremos con periodos de recurrencia de más de 10 años. La avenida en la cuenca de drenaje de estudio, debida a una precipitación de un periodo de retorno también superior a 10 años (según los parámetros de la Norma 5.2-IC), supuso el transporte de 2915 toneladas de materiales en poco menos de 4 horas, de las cuales el 60% eran de roca madre. Este corto pero intenso episodio ha generado una erosión que, en condiciones de estabilidad ambiental, probablemente no alcanzaría valores tan altos en un amplísimo periodo de tiempo, gracias al efecto mitigador de la protección del suelo, como se ha demostrado en otras experiencias (Castro Rodríguez, 1994; Dóniz Paez, 2013; Lasanta Martínez *et al.*, 2010; Romero Díaz *et al.*, 2012).

Finalmente, en relación con el desequilibrio ambiental que favorece los procesos erosivos, conviene mencionar que estas pérdidas de suelo, aun teniendo en cuenta la caracterización geomorfológica y climática de la zona, podrían mitigarse si se establecen medidas correctoras adecuadas, muchas de las cuales son incluso compatibles con la actividad agrícola. Prosdocimi *et al.* (2016), por ejemplo, demuestran que con la técnica del *mulching* puede reducirse la erosión en parcelas de viñedos en un 78%, y Cerdà *et al.* (2016) calcularon una reducción de la tasa de erosión en cultivos arbóreos de hasta el 96%. Casali *et al.* (2009) hablan de reducir los marcos de plantación e instalar en ellos cubiertas de vegetación a modo de bandas. Novara *et al.* (2011) proponen los cultivos mixtos, puesto que al combinar árboles y otra cubierta vegetal se produce una mejor protección del suelo. Por último, incluso un simple cambio en el sentido del labrado respecto a la pendiente (de paralelo a transversal) ya puede producir una cuantiosa disminución de la erosión, cifrada en un 50% por Romero Díaz *et al.* (2012) y en un 55% por Poesen *et al.* (1997). Como puede apreciarse, no son medidas de un excesivo coste, ni económico ni técnico, que con una mayor sensibilización del agricultor podrían llevarse a cabo fácilmente. De hecho, algunas políticas públicas agrarias están incorporando este tipo de medidas paulatinamente, aunque quizá no tan decididamente como se debiera (Martínez Hernández *et al.*, 2015).

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con este trabajo deben interpretarse con la cautela asociada al estudio de un episodio puntual, ya que los fenómenos hidrológicos y erosivos en el campo deben llevarse a cabo de una manera lo más dilatada posible en el tiempo para poder apreciar con más perspectiva su total desarrollo e integridad espacial y temporal. Teniendo en cuenta este contexto de puntualidad, compensada por la intensidad de los efectos ambientales cuantificados y el análisis de la bibliografía científica, se puede concluir que los eventos tormentosos extremos parece que son los que más intensamente

reconfiguran el paisaje. Esto se hace más evidente cuando se trata de cuencas sedimentarias con suelos poco cohesionados y apenas cubiertos de vegetación natural, intensificándose aún más cuando se practica en ellos una agricultura poco conservacionista edafológicamente, como es el caso. Los almendros, con escasa copa arbórea y un amplio marco de plantación, desprotegen el suelo de forma permanente, frente al cultivo del cereal que, salvo en las fases de siembra y crecimiento inicial, constituye una cubierta edáfica más eficaz. Se puede concluir que los usos actuales del suelo agrícola, que tienden a ser menos respetuosos con la conservación de suelo, son un factor de riesgo más ante los fenómenos hidrológicos intensos causados por lluvias torrenciales.

Ante la desprotección del suelo, la fuerte avenida generada por estas lluvias torrenciales genera un caudal, en un corto periodo de tiempo, canalizador de abundante energía desestabilizadora, que puede causar puntos de debilidad en tramos determinados del cauce, sobre todo hacia su desembocadura, donde la corriente alcanza valores altos de potencialidad erosiva y se producen incisiones. El cauce entonces busca un nuevo punto de máxima estabilidad o mínima energía a través de una erosión remontante, siendo capaz de movilizar con su energía cinética grandes volúmenes y peso de materiales, que efectivamente han sido cuantificados con este estudio en valores muy altos.

Es preocupante, pese a que la pérdida de suelo en estas áreas geográficas es muy importante tras eventos tormentosos extremos, tal como se ha demostrado, la poca sensibilidad que los agricultores muestran hacia esta pérdida de suelo fértil, dado el gran espesor de roca madre deleznable que existe y fácilmente se transforma en sustrato para el cultivo. Existen multitud de medidas correctoras compatibles con la práctica agrícola que pueden introducirse para mitigar los efectos hidrológicos y erosivos que generan las lluvias torrenciales, más o menos frecuentes en función de su intensidad, y que sin embargo en esta zona no se están contemplando. Quizá sería aconsejable incluirlas más asiduamente en las políticas agrarias públicas. Algunos ejemplos son el *mulching*, las bandas de sotobosque en los marcos de plantación o el cultivo mixto arbóreo-gramíneas en la misma parcela.

Estos procesos ambientales no son solo un riesgo directo para el agricultor, sino también para el equilibrio dinámico de toda la cuenca, puesto que las avenidas intensas de este tipo son capaces de transportar y depositar ingentes cantidades de suelo agrícola entarquinando y reduciendo la capacidad de almacenar agua en las infraestructuras hidráulicas del entorno, sobre todo embalses.

Por último, parece necesario mencionar que, aunque el rigor científico está garantizado, los datos hidrológicos proporcionados pueden variar si se usan otras fórmulas, aun para las mismas variables, en función de consideraciones previas como el periodo de retorno de la tormenta y caracterizaciones geográficas del área de estudio, como se ha ido explicando en el epígrafe metodológico. Del mismo modo, los datos de pérdidas de suelo deben concebirse como estimaciones lo más realistas posible, no de forma cerrada. Es de destacar también la limitación que ha supuesto la falta de más réplicas en las muestras de suelo y la existencia de una única estación meteorológica, de propiedad particular, para la obtención de los datos pluviométricos.

ORCID iD

Carlos Martínez-Hernández  <https://orcid.org/0000-0002-6526-6905>

Miguel Angel López Sandoval  <https://orcid.org/0000-0002-2961-700X>

Núria Torrente García  <https://orcid.org/0000-0003-2407-3215>

Martín López Sandoval  <https://orcid.org/0000-0001-9484-4703>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belmonte Serrato, F., & Romero Díaz, A. (2013). *Intercepción de la lluvia por la vegetación en España* [Rain interception by vegetation in Spain]. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua.
- Beven, K. (2002). Runoff generation in semi-arid areas. In L. J. Bull, & M. J. Kirkby (Eds.), *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels* (pp. 57-105). Wiley.
- Brandt, J., & Thornes, J. B. (1996). *Mediterranean Desertification and Land Use*. Wiley.
- Butzer, K. W. (2005). Environmental history in the Mediterranean world: crossdisciplinary investigation of cause-and-effect for degradation and soil erosion. *Journal of Archaeological Science*, 32(12), 1773-1800. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.06.001>
- Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. (2000). *Mapa digital de suelos de la Región de Murcia* [Digital soil map of the Region of Murcia]. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. <http://www.murcianatural.carm.es/web/guest>
- Casali, J., Giménez, R., de Santiesteban, L., Álvarez Mozos, J., Mena, J., & del Valle de Lersundi, J. (2009). Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *Catena*, 78(1), 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.02.015>
- Castejón-Porcel, G., Espín-Sánchez, D., Ruiz-Álvarez, V., & García-Marín, R. (2018). Runoff water as a resource in the Campo de Cartagena (Region of Murcia): current possibilities for use and benefits. *Water*, 10(4), 456. <https://doi.org/10.3390/w10040456>
- Castro Rodríguez, J. (1994). *Control de la erosión en cultivos leñosos con cubiertas vegetales vivas* [Control of erosion in woody crops with living plant covers]. [Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=69123>
- Cerdà, A., González-Pelayo, O., Giménez-Morera, A., Jordán, A., Pereira, P., Novara, A., & Ritsema, C. J. (2016). Use of barley straw residues to avoid high erosion and runoff rates on persimmon plantations in Eastern Spain under low frequency-high magnitude simulated rainfall events. *Soil Resilance*, 54(2), 154-165. <https://doi.org/10.1071/SR15092>
- Cuadrat, J. M., & Pita, M. F. (2006). *Climatología* [Climatology]. Cátedra.
- De Alba, S., Benito, G., & Pérez González, A. (1998). Erosión de suelo en episodios de lluvia de elevada intensidad versus episodios de moderada y baja intensidad y elevada frecuencia en ambientes semiáridos [Soil erosion in high intensity rain episodes versus moderate and low intensity episodes and high frequency in semi-arid environments]. In A. Gómez Ortiz, & F. Salvador Franch (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española* [Recent research in Spanish Geomorphology] (pp. 483-492). Sociedad Española de Geomorfología.
- De Ploey, J., Imeson, A., & Oldeman, L. R. (1991). Soil Erosion, Soil Degradation and Climatic Change. In F. M. Brouwer, A. J. Thomas, & M. J. Chadwick (Eds.), *Land Use Changes in Europe* (pp. 275-292). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3290-9>
- Dóniz Páez, F. J. (2013). Tipo de cultivos y procesos de escorrentía en Las Llanadas, Los Realejos (Tenerife, España) [Type of crops and runoff processes in Las Llanadas, Los Realejos (Tenerife, Spain)]. *Vegueta: Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 13, 165-176.
- Durán Zuazo, V. H., Francia Martínez, J. R., García Tejero, I. F., Arroyo Panadero, L., & Martínez Raya, A. (2012). Mitigación de la erosión de suelos en plantaciones de almendro por cubiertas vege-

- tales. Implicaciones para la agricultura sostenible de montaña (SE España) [Mitigation of soil erosion in almond plantations by plant covers. Implications for sustainable mountain agriculture (SE Spain)]. *Comunicata Scientiae*, 3(2), 123-129.
- Faulkner, H., Alexander, R., & Wilson, B. R. (2003). Changes to the dispersive characteristics of soils along an evolutionary slope sequence in the Vera badlands, southeast Spain: implications of site stabilization. *Catena*, 50(2-4), 243-254. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00137-6)
- Faust, D., & Schmidt, M. (2009). Soil erosion processes and sediment fluxes in a Mediterranean marl landscape, Campiña de Cádiz, SW Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 52(2), 247-265. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2009/0053-0247>
- Fernández Carrillo, M. A. (2015). *Medidas y técnicas de conservación de los suelos en el medio rural. Aplicación en España y la Región de Murcia* [Soil conservation measures and techniques in rural areas. Application in Spain and the Region of Murcia]. [Tesis Doctoral, Universidad de Murcia]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=155199>
- Fernández Lorenzo, C., Bueno Herrero, D., & García Ruiz, O. (2017). Efectos del uso del territorio en la erosión de suelos en España [Effects of land use on soil erosion in Spain]. *Molequla*, 25, 73-76.
- Gajić, B., Kresović, B., Tapanarova, A., Životić, L., & Todorović, M. (2018). Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. *Agricultural Water Management*, 210, 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.002>
- García-Ruiz, J. M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review. *Catena*, 81(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.001>
- García-Ruiz, J. M., & López-Bermúdez, F. (2009). *La erosión del suelo en España* [Soil erosion in Spain]. Sociedad Española de Geomorfología.
- Kakembo, V., Xanga, W., & Rowntree, K. (2009). Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa local municipality, Eastern Cape, South Africa. *Geomorphology*, 110(3-4), 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.04.006>
- Khaledian, Y., Kiani, F., Ebrahimi, S., Brevik, E. C., & Aitkenhead-Peterson, J. (2016). Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. *Land Degradation and Development*, 28(1), 128-141. <https://doi.org/10.1002/ldr.2541>
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L. H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R. ... Vacca, A. (1997). The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29(1), 45-59. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00062-8)
- Lasanta Martínez, T., Nadal Romero, M. E., Serrano Muela, M. P., Vicente Serrano, S. M., & García Ruiz, J. M. (2010). Escorrentía y erosión tras el abandono de tierras de cultivo en montaña: resultados de la estación experimental "Valle de Aísa" [Runoff and erosion after the abandonment of farmland in the mountains: results of the experimental station "Valle de Aísa"]. *Pirineos*, 165, 115-133. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165006>
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications.
- Li, S., Lobb, D. A., & Lindstrom, M. J. (2007). Tillage translocation and tillage erosion in cereal-based production in Manitoba, Canada. *Soil and Tillage Research*, 94(1), 164-182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.019>
- López-Bermúdez, F. (1973). *La Vega Alta del Segura. Clima, Hidrología y Geomorfología* [The Vega Alta del Segura. Climate, Hydrology and Geomorphology]. [Tesis Doctoral, Universidad de Murcia]. DIGITUM Biblioteca Universitaria. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/34542>
- López-Bermúdez, F. (1990). Soil erosion by water on the desertification of a semi-arid Mediterranean fluvial basin: the Segura basin, Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 33(2), 129-145. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(90\)90238-9](https://doi.org/10.1016/0167-8809(90)90238-9)
- López-Bermúdez, F. (2006). Erosión y desertificación [Erosion and desertification]. In A. Romero Díaz, & F. Alonso Sarría (Coords.), *Atlas Global de la Región de Murcia* [Global Atlas of the Region of Murcia] (pp. 166-175). La Verdad.
- López Gómez, J., & López Gómez, A. (1959). El clima de España según la clasificación de Köppen [The climate of Spain according to the Köppen classification]. *Estudios Geográficos*, 20(75), 167-188.

- Lou, Y., Lü, Y., Fu, B., Zhang, Q., Li, T., Hu, W., & Comber, A. (2019). Half century change of interactions among ecosystem services driven by ecological restoration: Quantification and policy implications at a watershed scale in the chinese loess plateau. *Science of the Total Environment*, 651(part 2), 2546-2557. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.116>
- Luna, L., Miralles, I., Lázaro, R., Contreras, S., & Solé-Benet, A. (2018). Effect of soil properties and hydrologic characteristics on plants in a restored calcareous quarry under a transitional arid to semiarid climate. *Ecohydrology*, 11(6), e1896. <https://doi.org/10.1002/eco.1896>
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. MacGraw-Hill.
- Mamede, G. L., Guentner, A., Medeiros, P. H. A., de Araújo, J. C., & Bronstert, A. (2018). Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001701](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001701)
- Martínez-Casasnovas, J. A., Ramos, M. C., & Ribes-Dasi, M. (2002). Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma*, 105(1-2), 125-140. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00096-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00096-9)
- Martínez-Hernández, C. (2017). *El abandono de campos de cultivo en la Región de Murcia. Causas y consecuencias medioambientales y socioeconómicas* [The abandonment of cultivated fields in the Region of Murcia. Environmental and socio-economic causes and consequences]. [Tesis Doctoral, Universidad de Murcia]. Tesis Doctorals en Xarxa. <https://www.tdx.cat/handle/10803/405714#page=1>
- Martínez-Hernández, C., Romero Díaz, A., Belmonte Serrato, F., & Ferretjans Martín, A. B. (2015). Las ayudas de retirada de tierras de la PAC en los espacios naturales de la Región de Murcia: evaluación de su eficacia medioambiental al término de su periodo de aplicación [The CAP set-aside aid in natural spaces in the Murcia Region: evaluation of its environmental effectiveness at the end of its application period]. In Grupo de Investigación Análisis Territorial (Ed.), *II Congreso Internacional SETED-ANTE "Seminario Estado, Territorio y Desarrollo"* [II International Congress SETED-ANTE "State, Territory and Development Seminar"] (pp. 817-834). Universidad de Santiago de Compostela.
- Martínez-Hernández, C., Rodrigo-Comino, J., & Romero-Díaz, A. (2017). Impact of lithology and soil properties on abandoned dryland terraces during the early stages of soil erosion by water in south-east Spain. *Hydrological Processes*, 31(17), 3095-3109. <https://doi.org/10.1002/hyp.11251>
- Millares, A., Díez-Minguito, M., & Moñino, A. (2019). Evaluating gully effects on modeling erosive responses at basin scale. *Environmental Modelling and Software*, 111, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.018>
- Ministerio de Fomento. (2016). *Norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras* [Norm 5.2-IC surface drainage of the Highway Instruction]. Orden FOM/298/2016, Boletín Oficial del Estado de 10 de marzo de 2016, 18882-19023.
- Moore, I. D., Geesler, P., Nielsen, G., & Paterson, G. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America*, 57(2), 443-452. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>
- Novara, A., Gristina, L., Saladino, S. S., Santoro, A., & Cerdà, A. (2011). Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. *Soil & Tillage Research*, 117, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.007>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., ... & Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Nature Scientific Reports*, 7, 4175.
- Parsons, A. J., Wainwright, J., Stone, P. M., & Abrahams, A. D. (1999). Transmission losses in rills on dryland hillslopes. *Hydrological Processes*, 13(17), 2897-2905. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19991215\)13:17%3C2897::AID-HYP905%3E3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19991215)13:17%3C2897::AID-HYP905%3E3.0.CO;2-B)
- 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., Van Wesemael, B., Govers, G., Martínez Hernández, J., Desmet, P., Vandaele, K., Quine, T., & Degraer, G. (1997). Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion. *Geomorphol-*

- ogy, 18(3-4), 183-197. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00025-6)
- Prosdocimi, M., Jordán, A., Tarolli, P., Keesstra, S., Novara, A., & Cerdà, A. (2016). The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. *Science Total Environment*, 547, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.076>
- Romero Díaz, A., & Ruiz Sinoga, J. D. (2016). Assessment of soil erosion through different experimental methods in the Region of Murcia (South-East Spain). In A. P. Dykes, M. Mulligan, & J. Wainwright (Eds.), *Monitoring and Modelling Dynamic Environments* (pp. 11-44). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118649596.ch2>
- Romero Díaz, A., Marín Sanleandro, P., & Sánchez Soriano, A. (2009). Procesos de piping en la Región de Murcia (sureste de España) [Piping processes in the Murcia Region (southeast of Spain)]. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35(1), 87-117.
- Romero Díaz, A., Martínez Hernández, C., & Belmonte Serrato, F. (2012). Cambios de usos del suelo en la Región de Murcia. El almendro como cultivo de referencia y su relación con los procesos de erosión [Changes in land use in the Region of Murcia. The almond tree as a reference crop and its relationship with erosion processes]. *Nimbus*, 29-30, 607-626.
- Sánchez Soriano, A. (2012). *Procesos de erosión subsuperficiales (piping) en la Región de Murcia* [Subsurface erosion processes (piping) in the Region of Murcia]. [Tesis Doctoral, Universidad de Murcia]. DIGITUM Biblioteca Universitaria. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/28778>
- Seutloali, K., Dube, T., & Mutanga, O. (2017). Assessing and mapping the severity of soil erosion using the 30-m Landsat multispectral satellite data in the former South African homelands of Transkei. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.001>
- Solé Benet, A., Cantón, Y., Lázaro, R., & Puigdefábregas, J. (2009). Weathering and erosion in the Tabernas sub-desert, Almería. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35(1), 141-163. <https://doi.org/10.18172/cig.1216>
- Thornes, J. B. (1976). Semiarid erosional systems: case studies from Spain. *Geographical Papers*, 7. London School of Economics and Political Science.
- Wang, Y., You, W., Fan, J., Jin, M., Wei, X., & Wang, Q. (2018). Effects of subsequent rainfall events with different intensities on runoff and erosion in a coarse soil. *Catena*, 170, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.008>
- Wolf, D., Seim, A., Díaz del Olmo, F., & Faust, D. (2013). Late quaternary fluvial dynamics of the Jarama river in central Spain. *Quaternary International*, 302, 20-41. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.02.012>
- Yang, D., Kanae, S., Oki T., Koike, T., & Musiaké, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 17(14), 2913-2928. <https://doi.org/10.1002/hyp.1441>
- Zhong, R., He, Y., & Chen, X. (2018). Responses of the hydrological regime to variations in meteorological factors under climate change of the tibetan plateau. *Atmospheric Research*, 214, 296-310. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.008>