

PREDICCIÓN DE CÁRCAVAS EFÍMERAS MEDIANTE EL ÍNDICE TOPOGRÁFICO COMBINADO EN UNA MICROCUENCA DE OLIVAR EN ANDALUCÍA (ESPAÑA)

PREDICTION OF EPHEMERAL GULLIES BY USING THE COMBINED TOPOGRAPHICAL INDEX IN A MICRO-CATCHMENT OF OLIVE GROVES IN ANDALUCIA, SPAIN

Encarnación Taguas^{1*}, Yongping Yuan², Adolfo Peña¹, J. Luis Ayuso¹

¹Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Rural. Campus Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, 14071, Córdoba, España (evtaguas@uco.es). ² USDA-ARS-NSL. PO Box 1157, Oxford, 38655. Mississippi, EE.UU.

RESUMEN

La mayoría de los estudios sobre erosión en olivar para examinar el efecto de la erosión laminar y por regueros se han efectuado a escala de parcela. Sin embargo, trabajos realizados sobre otros usos de suelo y a menores escalas en el ámbito Mediterráneo han justificado que la pérdida de suelo derivada del flujo concentrado puede ser decisiva en el balance total. El índice topográfico combinado (ITC) es un parámetro para localizar y describir la iniciación de cárcavas efímeras para un tipo de suelo, uso y manejo, que podría complementar la información de otros índices como la ecuación universal de pérdida de suelo para erosión laminar y por regueros. El ITC fue aplicado en una microcuenca de olivar bajo mínimo laboreo con cubierta espontánea localizada en el área centro-occidental de Andalucía (España). A partir de la digitalización de las cárcavas efímeras sobre una ortofoto de alta resolución, se comparó el grado de acierto de los píxeles predichos y observados y se estimaron valores entre 3 y 5 como umbrales característicos para las resoluciones de 1.5 m y 3.0 m. Estos valores críticos son útiles para la localización de cárcavas en otras cuencas, independientemente de la escala, donde el régimen de lluvias sea comparable así como el tipo de suelo (Cambisol) y manejo (no laboreo con cubierta espontánea en primavera). A pesar de la idoneidad del índice para localizar la mayor parte de las cárcavas, diferentes mecanismos de desarrollo de cárcavas fueron identificados en campo sobre las cárcavas peor representadas. Pese a los valores bajos del área de desagüe en las cabeceras de éstas, su presencia es explicada por la función del material cálcico superficial y de los elevados valores de conductividad hidráulica saturada, favoreciendo la acumulación de flujo y disminuyendo la resistencia del suelo al arranque de sedimentos.

ABSTRACT

Most studies of erosion in olive groves to examine the effect of sheet and rill erosion have been conducted at plot scale. However, work done on other land uses and at minor scales in the Mediterranean area have justified that the loss of soil resulting from concentrated flow can be decisive in the total balance. The compound topographic index (CTI) is a parameter to locate and describe the initiation of ephemeral gullies for a type of soil, use and management that could complement information from other indices, such as the universal equation of soil loss from sheet and rill erosion. The CTI was applied in an olive micro-catchment under minimum tillage with spontaneous cover, located in the western central area of Andalucía (Spain). After the digitization of ephemeral gullies on a high-resolution orthophoto, the degree of success of each of the observed and predicted pixels was compared to one another and values between 3 and 5 were estimated as the characteristic thresholds for the resolutions of 1.5 m and 3.0 m. These critical values are useful for the localization of gullies in other catchments, regardless of the scale, where the rainfall pattern is comparable, as well as the type of soil (Cambisol) and management (no-till with spontaneous grass cover in spring). Despite the suitability of the index to locate most of the gullies, different mechanisms of gully development were identified in field over the worst-represented gullies. Despite the low values of the drainage areas at the headwaters of them, their presence is explained by the role of the surface calcium material and high saturated hydraulic conductivity values, favoring the accumulation of flow and reducing the resistance of soil to the removal of sediments.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Diciembre, 2008. Aprobado: Marzo, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 409-426. 2010.

Key words: ephemeral gully, compound topographic index (CTI), olive, micro-catchment, soil properties.

Palabras clave: cárcavas, índice topográfico combinado (ITC), olivar, microcuencas, propiedades de suelo.

INTRODUCCIÓN

El 12.6 % de la superficie de España está amenazada por riesgos de erosión muy severos o severos, mientras que el 34.1 % presenta un riesgo medio (MMA, 2007). Elevadas tasas de erosión están asociadas a áreas agrícolas dedicadas al cultivo de la vid (*Vitis vinifera* L.), el almendro (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb) y el olivo (*Olea europaea* L. subsp. *europaea*), debido a restricciones ambientales derivadas del clima, la topografía y manejos de suelo inadecuados (De Santisteban *et al.*, 2006). Estos cultivos tan importantes para la economía española se extienden en las áreas más susceptibles a la desertificación.

El olivar en Andalucía es el cultivo más importante en términos de ingresos, empleo y valor paisajístico y cultural. En esta región hay 1.48 M ha dedicadas a olivar (Junta de Andalucía, 2003) que producen el 33 % de la producción mundial de aceite de oliva (Civantos, 2001). La erosión en olivar con distintos manejos de suelo ha sido estudiada por Gómez *et al.* (2004), Francia *et al.* (2006) y Gómez *et al.* (2009). La mayoría de los estudios fueron realizados en parcelas de ladera donde predominan los procesos de erosión laminar y por regueros, mientras que a menores escalas la erosión por cárcavas y la caída de taludes en arroyos y ríos también contribuyen significativamente a la descarga total de sedimentos (Poesen *et al.*, 2003). El estudio de los procesos erosivos a escala de microcuenca cuenta con la ventaja de usar una unidad geomorfológica natural no aislada como en el caso de las parcelas, que además se adapta al tamaño de la pequeña y mediana propiedad en Andalucía. El uso de modelos permite además optimizar la información proporcionada por los datos reales, como en los trabajos realizados en pequeñas cuencas de olivar con el modelo AnnAGNPS (Bingner *et al.*, 2009) dirigidos al análisis de sensibilidad del mismo (Aguilar y Polo, 2005) así como a su calibración (Taguas *et al.*, 2009). La combinación de datos y el ejercicio de modelado ha de permitir conocer el balance de escorrentía y erosión a una escala espacial que engloba un número muy reducido de fincas y además la obtención de soluciones y estrategias de protección concretas y fácilmente aplicables.

INTRODUCTION

In Spain, 12.6 % of its area is threatened by very severe and severe erosion risks, while 34.1 % records medium risk (MMA, 2007). High rates of erosion are associated with agricultural areas dedicated to the cultivation of the grapevine (*Vitis vinifera* L.), almond (*Prunus dulcis* (Mill.) DA Webb) and olive (*Olea europaea* L. subsp. *europaea*), due to environmental restrictions because of the climate, topography and inadequate soil management (De Santisteban *et al.*, 2006). These crops that are so important for the Spanish economy are concentrated in the areas most susceptible to desertification.

The olive grove in Andalucía is the most important crop in terms of income, employment and cultural landscape value. In this region there are 1.48 M ha with olive plantations (Junta de Andalucía, 2003) producing 33 % of the world production of olive oil (Civantos, 2001). Erosion in olive orchards with different soil management systems has been studied by Gómez *et al.* (2004), Francia *et al.* (2006) and Gómez *et al.* (2009). Most studies focused on hillside plots where sheet and rill erosion processes prevail, while at smaller scales, gully erosion and the fall of slopes on streams and rivers also contribute significantly to the total sediment discharge (Poesen *et al.*, 2003). The study of erosion at micro-catchment scale has the advantage of using a non-isolated natural geomorphological unit, as in the case of plots, which also adjusts to the size of the small and medium-sized property in Andalucía. The use of models also allows to optimize the information provided by actual data, as in the work carried out in small catchments of olive groves with the AnnAGNPS model (Bingner *et al.*, 2009), aimed at the analysis of its sensitivity (Aguilar and Polo, 2005) as well as its calibration (Taguas *et al.*, 2009). The combination of data and the modeling exercise should allow to see the results of runoff and erosion at a spatial scale that encompasses a very small number of farms, and also to obtain solutions and concrete protection strategies easy to implement.

Gullies and ephemeral gullies are sources of sediment that contribute significantly to soil loss in cultivated areas of the Mediterranean (Poesen *et al.*, 2003, Martinez-Casasnovas *et al.*, 2005). This contribution varies with the spatial and temporal scale and the soil management and environmental

Las cárcavas y cárcavas efímeras son fuentes de sedimentos que contribuyen significativamente a la pérdida de suelo en áreas cultivadas del Mediterráneo (Poesen *et al.*, 2003; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2005). Esta contribución varía con la escala espacial y temporal y los factores manuales y ambientales (propiedades del suelo, el uso, el clima y el relieve; Poesen *et al.*, 2003). La erodibilidad y el esfuerzo cortante son las principales variables para caracterizar la resistencia del suelo a la erosión causada por el flujo concentrado (Knapen *et al.*, 2007). En ambas variables influyen la textura, el contenido de materia orgánica, los fragmentos de roca superficial, la compactación, así como otros atributos derivados del uso y manejo del suelo y sus características químicas. Los umbrales topográficos que caracterizan la aparición del flujo concentrado y la generación de cárcavas en las laderas para un mismo tipo, uso y manejo del suelo han sido estudiados por Thorne y Zevenbergen (1990), Desmet *et al.* (1999) y Cheng *et al.* (2007). Todos los índices o modelos topográficos usaron una relación similar a la ecuación 1:

$$A_d^b S Pl^c > I \quad (1)$$

donde, A_d es el área de desagüe aguas arriba del punto considerado; b es el exponente relativo al área; S es la pendiente local aguas arriba; Pl es la curvatura plana local, no considerada en algunas expresiones (exponente $c=0$); I es el umbral crítico a partir del cual se produce un flujo concentrado cuyo esfuerzo cortante es superior a la tensión crítica de la superficie del suelo, que genera la incisión y el desarrollo de las cárcavas.

En el caso del olivar, no hay estudios previos que hayan aplicado este tipo de índice para establecer umbrales para la localización y predicción de cárcavas, a pesar de su importancia como fuentes de sedimentos sugeridos por Gómez *et al.* (2008). Aunque es preciso evaluar el efecto de la variabilidad de las propiedades del suelo a pequeña escala, la extensión de esta metodología a olivares bajo diferentes tipos de suelo y manejo permitiría la elaboración de mapas de riesgo de erosión por flujo concentrado adecuados para una mejor planificación de las medidas de protección del suelo.

El National Sedimentation Laboratory del USDA-ARS, según Thorne y Zevenbergen (1990) ha

factores (soil properties, use, climate and relief, Poesen *et al.*, 2003). Erodibility and shear stress are the main variables to characterize soil resistance to erosion caused by concentrated flow (Knapen *et al.*, 2007). Both variables are affected by the texture, organic matter content, surface rock fragments, compaction as well as other attributes resulting from the use and management of soil and its chemical characteristics. The topographic thresholds that characterize the appearance of the concentrated flow and the generation of gullies on the slopes for the same type, use and management of soil have been studied by Thorne and Zevenbergen (1990), Desmet *et al.* (1999) and Cheng *et al.* (2007). All indices or topographic models used a relationship similar to equation 1:

$$A_d^b S Pl^c > I \quad (1)$$

where A_d is the drainage area upstream of the point considered; b is the exponent relative to the area; S is the local slope upstream; Pl is the local flat curvature, not considered in some expressions (exponent $c=0$); I is the critical threshold from which there is a concentrated flow whose shear exceeds the critical stress of the soil surface, which generates the incision and development of gullies.

In the case of olive groves, there are no previous studies applying this type of index to establish thresholds for the location and prediction of gullies, despite their importance as sediment sources, as suggested by Gómez *et al.* 2008. Although it is necessary to evaluate the effect of the variability of soil properties at a small scale, the extension of this methodology to olive groves under different soil types and management would allow mapping the erosion risk from concentrated flow suitable for a better planning of soil protection measures.

The National Sedimentation Laboratory, USDA-ARS, according to Thorne and Zevenbergen (1990), has systematized the use of the compound topographic index (CTI, equation 1, $b=1$, $c=1$) in a geographic information system to automate calculations derived from the digital terrain model. The CTI's capacity to predict ephemeral gully has been verified at farm-scale with different land uses: maize (*Zea mays* L.), sorghum (*Sorghum* spp) and soybean (*Glycine max* L.) (Parker *et al.*, 2007). The CTI is based on the

sistematizado el uso del índice topográfico combinado (compound topographic index, ITC, ecuación 1, $b=1$, $c=1$) en un sistema de información geográfica para automatizar los cálculos derivados del modelo digital del terreno. La capacidad del ITC para predecir cárcavas efímeras ha sido verificada a escala de finca con diferentes usos de suelo: maíz (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum* spp) y soja (*Glycine max* L.) (Parker *et al.*, 2007). Este índice se basa en el concepto de potencia del canal (Bagnold, 1966) y es función de la descarga, la pendiente y la anchura del mismo. La descarga es sustituida por el área de desagüe, mientras que la curvatura plana representa el grado de concentración o de convergencia del flujo (Zevenbergen y Thorne, 1987).

Este estudio aborda la determinación de los umbrales topográficos para la formación de cárcavas efímeras en condiciones climáticas y de manejo específicos que pueden aplicarse a otros olivares similares en Andalucía. Los objetivos fueron: 1) evaluar las potencialidades del ITC para localizar cárcavas efímeras en una microcuenca de olivar; 2) examinar la sensibilidad de las variables topográficas que intervienen así como la posible influencia de la erodibilidad en la distribución espacial de las cárcavas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca de estudio se sitúa en la localidad de Puente Genil, al oeste de la provincia de Córdoba (37.4 °N, 4.8 °O; Figura 1). El área de desagüe es 6.1 ha, la elevación media 239 m y la pendiente media del terreno 15 %. El régimen climático es Mediterráneo típico y la precipitación media anual es 400 mm. La temperatura media del mes más cálido es 26.5 °C (julio) y la del mes más frío, 8.4 °C (enero). El suelo es de tipo Cambisol cálcico (clasificación de la FAO), caracterizado por una profundidad media de 30 cm, textura franco-arenosa, con afloramiento de materiales cálcicos en la superficie. Los olivos del área de cabecera tienen unos 10 años, separados con un marco de 7×7 m. Las labores de la finca se han ido reduciendo para disminuir los costes. Además de la recolección donde se pasa el rulo para preparar la recogida en diciembre, los productos fitosanitarios son aplicados dos veces al año alrededor del árbol (octubre y abril) y se realizan dos o más pases con el tractor en las calles en abril o mayo para controlar mecánicamente el desarrollo de la vegetación espontánea.

concept of channel power (Bagnold, 1966) and is a function of its discharge, slope and width. The discharge is replaced by the drainage area, while the flat curve represents the degree of concentration or convergence of flow (Zevenbergen and Thorne, 1987).

This study addresses the determination of topographical thresholds for ephemeral gully formation in specific climatic conditions and management that can be applied to other similar olive groves in Andalucía. The objectives were: 1) to assess the potential of CTI to locate ephemeral gullies in an olive grove micro-catchment, 2) examine the sensitivity of the topographic variables involved and the possible influence of erodibility on the spatial distribution of ephemeral gullies.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study catchment is located in the town of Puente Genil, west of the province of Córdoba (37.4 °N, 4.8 °W; Figure 1). The drainage area is 6.1 ha, the average elevation 239 m and the mean slope 15 %. The climate regime is typical Mediterranean and mean annual precipitation is 400 mm. The mean temperature of the hottest month is 26.5 °C (July) and the coldest month, 8.4 °C (January). The soil is of the calcium Cambisol type (FAO classification), characterized by an average depth of 30 cm, sandy loam texture, with calcium material outcrops on the surface. The olive trees of the header area are about 10 years old, separated by a framework of 7×7 m. Farm works have been reduced to diminish costs. In addition to the roller being passed to prepare the collection in December, pesticides are applied twice a year around the tree (October and April) and two or more passes with the tractor are performed on the streets in April or May to mechanically control the development of spontaneous vegetation.

Description and characterization of gullies

Ephemeral gullies are small channels that if they were not transformed or repaired, would become permanent features of the drainage system (Smith, 1993). Poesen *et al.* (2002) consider that the transition from trail to ephemeral gully and finally gully is an ongoing process. In this paper, the criteria by Laflen *et al.* (1985) and Casali *et al.* (1999) as well as field support have been considered to detect ephemeral gullies (as opposed to streams) as those with a width exceeding 30 cm. An aerial orthophotography

Descripción y caracterización de cárcavas

Las cárcavas efímeras son definidas como pequeños canales que si no fuesen labrados o reparados, se convertirían en rasgos permanentes de la red de desagüe (Smith, 1993). Poesen *et al.* (2002) consideran que la transición de reguero a cárcava efímera y finalmente cárcava, constituye un proceso continuo. En el presente trabajo, los criterios de Lafflen *et al.* (1985) y de Casali *et al.* (1999) así como el apoyo de campo han sido considerados para discriminar como cárcavas efímeras (frente a los regueros) aquellas con anchura superior a 30 cm. Una ortofotografía aérea con una resolución de 30 cm derivada de un vuelo fotogramétrico realizado en diciembre de 2004, fue utilizada junto con el examen en campo para la localización, digitalización y caracterización de las cárcavas.

El índice topográfico combinado (ITC)

Thorne y Zevenbergen (1990) fueron los primeros autores en implementar el ITC (ecuación 1, $b=1$ y $c=1$) en las celdillas de un modelo de elevación del terreno, usando la metodología propuesta por Zevenbergen y Thorne (1987) para calcular la pendiente, la curvatura plana y área de desagüe. Los valores promediados de las cabeceras de las cárcavas de una finca con un mismo tipo, uso y manejo del suelo, fueron usados como la estimación probable del ITC crítico del sitio. El análisis en otras zonas experimentales mostró que la localización de las cárcavas efímeras predicha a partir de los valores de las celdillas con ITC superiores al umbral, coincidió casi exactamente con su localización.

En este caso un modelo de elevación del terreno de $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.001 \text{ m}$ (RMSE de la elevación = 0.200 m) obtenido del

with a 30 cm resolution taken during a photogrammetric flight held in December 2004, was used along with field examination for the detection, measuring and description of the gullies.

The compound topographic index (CTI)

Thorne and Zevenbergen (1990) were the first authors to implement the CTI (equation 1, $b=1$ and $c=1$) in the cells of a terrain elevation model, using the methodology proposed by Zevenbergen and Thorne (1987) to calculate the slope, flat curvature and drainage area. The average values of the heads of gullies in a plot with the same type, use and management of soil, were used as the probable estimates of the site critical CTI. Analysis in other experimental areas showed that the localization prediction of ephemeral gullies on the basis of the CTI values of the cells above the threshold, coincided almost exactly with their actual location.

In this case a terrain elevation model of $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.001 \text{ m}$ (elevation RMSE = 0.200 m) obtained from the photogrammetric flight conducted in December 2004 was used to calculate the values of A_d , S and PI in the catchment, according to the methodology described by Parker *et al.* (2007). The A_d and S parameters were obtained using the topographic toolset TOPAZ (Garbrecht and Marzt, 1999), while the distribution of PI was obtained from the DEMAT script (Behrens, 2004) for ArcView 3.2. (ESRI, 2000) with the formulas by Zevenbergen and Thorne (1987).

Parker *et al.* (2007) indicate that the predictive capacity of CTI decreased significantly below the screen resolutions to less than 10 m; they also describe an iterative process based on the visual observation-prediction comparison for the election of the

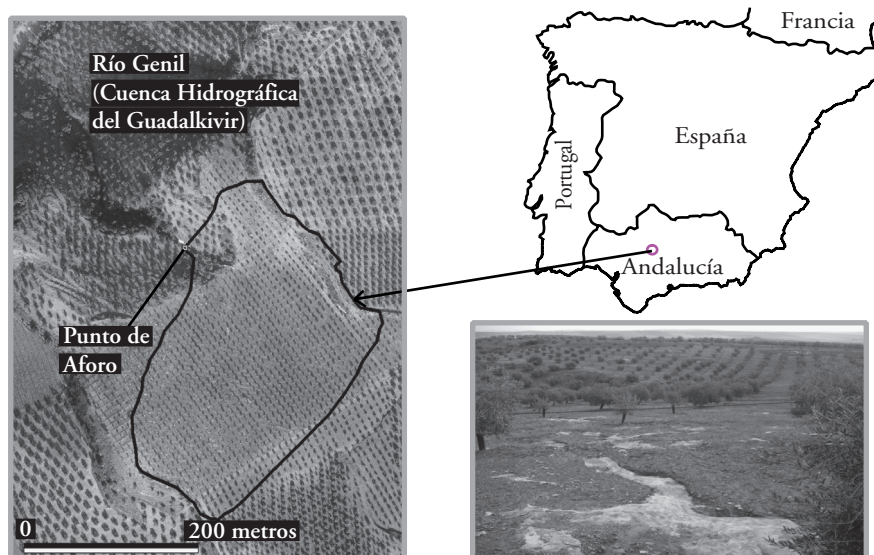


Figura 1. Localización y ortofotografía de la microcuenca (izquierda, derecha-arriba); vista de las laderas con cárcavas (octubre 2005, derecha-abajo).

Figure 1. Location and orthophotography of the micro-catchment (left, right-top); view of the slopes with gullies (October 2005, right-down).

vuelo fotogramétrico realizado en diciembre de 2004 fue usado para calcular los valores de A_d , S y Pl en la cuenca, de acuerdo con la metodología descrita por Parker *et al.* (2007). Los parámetros A_d y S fueron obtenidos aplicando el conjunto de herramientas topográficas TOPAZ (Garbrecht y Marzt, 1999), mientras que la distribución de Pl fue obtenida a partir del script DEMAT (Behrens, 2004) para Arcview 3.2. (ESRI, 2000) con las fórmulas de Zevenbergen y Thorne (1987).

Parker *et al.* (2007) determinan que la capacidad predictiva del ITC disminuía notablemente por debajo de resoluciones de la malla inferiores a 10 m; además, describen un proceso iterativo basado en la comparación visual observación-predicción para la elección del valor ITC crítico del sitio. En este caso, se han establecido criterios numéricos basados en la coincidencia de píxeles para evaluar el valor ITC crítico para identificar las cárcavas.

Influencia de la erodibilidad en el valor umbral del ITC

Poesen *et al.* (2003) y Knapen *et al.* (2007) destacan la importancia del uso del suelo, las características de la lluvia y las propiedades edafológicas sobre los límites topográficos para la generación de cárcavas. Así, a la escala de trabajo, los atributos del suelo serían las principales fuentes de variación ya que diferencias visuales identificadas en las laderas podrían justificar distintos grados de actividad y desarrollo de cárcavas. Los ensayos y el número de muestras de los trabajos para la caracterización del suelo fueron realizados durante mayo y junio de 2005 (Cuadro 1). De esta forma, se estableció una malla de 20×20 m en la cuenca donde una o dos muestras por cuadrícula fueron tomadas aleatoriamente. La densidad de muestreo fue mayor en las proximidades de las cárcavas. La localización de los puntos de muestreo fue realizada con un GPS de precisión ± 5 m.

Además, se examinaron los valores del ITC en las cabeceras de las cárcavas y la influencia de las propiedades de suelo sobre el valor crítico. Para ello fueron considerados los mapas de distribu-

CTI critical value of the site. In this case, numerical criteria have been established based on matching pixels to assess the CTI critical value identifying gullies.

Influence of erodibility in the CTI threshold value

Poesen *et al.* (2003) and Knapen *et al.* (2007) stress the importance of the use of soil, rainfall characteristics and soil properties over the topographic limits for the generation of gullies. Thus, at the working scale, soil attributes would be the main sources of variation as visual differences detected in the slopes could justify different degrees of activity and the development of gullies. Tests and the number of samples for soil characterization were conducted during May and June 2005 (Table 1). Thus a grid of 20×20 m was set in the catchment where one or two grid samples were randomly taken. Sampling density was higher in the vicinity of gullies. The location of the sampling sites was conducted with a GPS of ± 5 m precision.

Additionally, the values of CTI in the heads of gullies were examined, as well as the influence of soil properties on the critical value. In this procedure the distribution maps derived from the techniques of inverse of distance square and Kriging were utilized.

Burrough and McDonnell (1998) consider the interpolation methodology of the inverse of distance square (ICD) as the most reliable deterministic process to obtain continuous surfaces through point values. In this case, applications of ArcView Spatial Analyst 3.2. (ESRI, 2000) were used to determine the matrices, considering the weight of the four nearest neighboring points in the calculations.

Kriging is based on the theory of regionalized variables considering that the spatial variation in the phenomenon represented by the z values is statistically homogeneous across the study area, i.e., the same pattern of variation can be observed at all locations. The spatial variation is quantified by semivariograms

Cuadro 1. Propiedades de suelo, metodologías y número de muestras usadas en los ensayos de caracterización de suelo.
Table 1. Soil properties, methods and number of samples used in tests of soil characterization.

Variable	Metodología o ensayo	No. de muestras
Ar (%) [†]	Pipeta Robinson (Soil Conservation Service, 1972)	13
L (%) [‡]	Pipeta Robinson (Soil Conservation Service, 1972)	13
Ac (%) [§]	Pipeta Robinson (Soil Conservation Service, 1972)	13
MO (%) [¶]	Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1982)	13
Ksat (cm ⁻¹ h) [□]	Philip (1993)	26
Dap (g cm ⁻³) ^{††}	Medidas de masa y volumen de muestras a partir del peso sumergido ^{¶¶}	29

[†]Fracción arena; [‡]fracción limo; [§]fracción de arcilla; [¶]contenido de materia orgánica; [□]conductividad hidráulica saturada; ^{††}densidad aparente; ^{¶¶}uso de cera para impedir la variación de volumen al medir el peso sumergido ♦ [†] Sand fraction [‡] silt fraction [§] clay fraction; [¶] organic matter content; [□] saturated hydraulic conductivity; ^{††} bulk density; ^{¶¶} use of wax to avoid volume variation when measuring submerged weight.

ción derivados de las técnicas inverso del cuadrado de la distancia y Krigado.

Burrough y McDonnell (1998) consideran la metodología de interpolación del inverso del cuadrado de la distancia (ICD) como el proceso determinístico más fiable para obtener superficies continuas a través de valores puntuales. En este caso, se usaron las aplicaciones de Spatial Analyst de Arcview 3.2. (E.S.R.I., 2000) para determinar las matrices considerando en los cálculos el peso de los cuatro puntos vecinos más cercanos.

El Krigado está basado en la teoría de las variables regionalizadas considerando que la variación espacial en el fenómeno representado por los valores z es estadísticamente homogénea a través del área de estudio; es decir, el mismo patrón de variación puede ser observado en todas sus localizaciones. La variación espacial es cuantificada por semivariogramas (Isaaks y Srivastava, 1989). Los semivariogramas experimentales $\gamma(h)$ (ecuación 2) se calcularon con las observaciones puntuales $z(x_i)$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

donde, N es el número de pares de puntos separados por un paso o distancia; h es la selección de los pasos o intervalos de separación y fue evaluada mediante los criterios de información de Akaike (AIC, Akaike Information Criteria; Akaike, 1974) y Bayesiano (BIC, Bayesian Information Criteria; Schwarz, 1978). El uso del script para Arcview 3.2., Kriging 1.1 for ArcView Spatial Analyst (Boeringa, 2004) permite calcular el semivariograma experimental para diferentes valores de h y el semivariograma es entonces ajustado por optimización no lineal de acuerdo con la metodología de Levenberg-Marquardt. Cinco modelos de semivariogramas pueden ser ajustados: lineal, esférico, circular, exponencial y gaussiano. La decisión sobre el modelo de ajuste idóneo se basó en la evaluación del error medio cuadrático ($RMSE_{sem}$, ecuación 3) del modelo teórico y los valores del semivariograma experimental:

$$RMSE_{sem} = \sqrt{\frac{(Z_{iobs} - Z_{ifit})^2}{(N - 1 - n_p)}} \quad (3)$$

donde, Z_{iobs} son los valores observados; Z_{ifit} son los valores ajustados del semivariograma teórico; n_p es el número de parámetros que definen la función del semivariograma teórico (tres en todos los casos de estudio).

Finalmente, se aplicó validación cruzada extrayendo submuestras de k -individuos (K-fold cross validation; Goovaerts,

Isaaks and Srivastava, 1989). The experimental semivariograms $\gamma(h)$ (Equation 2) were calculated with the z point observations ($z(x_i)$):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

where N is the number of pairs of points separated by a step or distance; h is; the selection of the steps or intervals of separation and it was assessed using the Akaike Information Criteria (AIC, Akaike Information Criteria, Akaike, 1974) and Bayesian (BIC, Bayesian Information Criteria; Schwarz, 1978). The use of the script for Arcview 3.2., Kriging for ArcView Spatial Analyst 1.1 (Boeringa, 2004) allows to calculate the experimental semivariogram for different values of h , then it was adjusted by nonlinear optimization, according to the methodology by Levenberg-Marquardt. Five models of semivariograms can be adjusted: linear, spherical, circular, exponential and Gaussian. The decision on the appropriate adjustment model was based on the evaluation of the mean square error ($RMSE_{sem}$, equation 3) of the theoretical model and the values of the experimental semivariogram:

$$RMSE_{sem} = \sqrt{\frac{(Z_{iobs} - Z_{ifit})^2}{(N - 1 - n_p)}} \quad (3)$$

where Z_{iobs} are the values observed; Z_{ifit} are the adjusted values of the theoretical semivariogram; n_p is the number of parameters that define the role of the theoretical semivariogram (three in all the cases of study).

Finally, cross validation was applied by extracting subsamples of k -individuals (K-fold cross-validation; Goovaerts, 1997) and analyzing the mean square error values ($RMSE_v$) and average error (MAE_v) of the values predicted and observed with the two methods considered.

RESULTS AND DISCUSSION

Characteristics and distribution laws of ephemeral gullies

Seventeen gullies were identified (Table 2 and Figure 2) with a total length of 635.8 m and a length density according to the study area of 10.4 km km⁻². Based on the values of standard deviation (s)

1997) y analizando los valores del error medio cuadrático ($RMSEv$) y error medio ($MAEv$) de los valores predichos y observados con las dos metodologías consideradas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características y leyes de distribución de las cárcavas efímeras

Fueron identificadas 17 cárcavas (Cuadro 2 y Figura 2) con una longitud total de 635.8 m y una densidad de longitud de acuerdo al área de estudio de 10.4 km km^{-2} . Según los valores de la desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (CV), los atributos topográficos de las cabeceras variaron sustancialmente, en especial el parámetro A_d . De hecho, las cárcavas situadas en la ladera este (A-H) estaban localizadas en áreas con valores más elevados de A_d y Pl , mientras que las situadas en la ladera oeste ocuparon mayores S y resultaron menos continuas. En términos cuantitativos, se calculó una tasa de pérdida de suelo derivada de las cárcavas efímeras igual a $1.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, considerando la densidad aparente

and the variation coefficient (CV), the topographic attributes of headers varied substantially, especially the parameter A_d . In fact, the gullies of the eastern slope (A-H) were located in areas with higher levels of A_d and Pl , while those located on the west side occupied greater S and were less continuous. In quantitative terms, the estimate was a rate of soil loss resulting from ephemeral gullies equal to $1.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, considering the average bulk density of the catchment (1.56 g cm^{-3}), the period of no tillage operations (1999-2004) and a representative average depth of 15 cm.

The field test permitted to observe that the gullies M and F were generated by the deterioration of the semicircular borders at the base of olive trees associated with the concentration of flow (Figure 3). Numerous outcrops of calcium parental material were identified in the area with a high density of gullies on the eastern slope (Figure 3b), and in the gullies R, K and N, where there are also small drainage areas (Table 2).

Cheng *et al.* (2007) consider that acute risk of erosion derived from gullies starts from a density of

Cuadro 2. Características de las cárcavas de estudio.
Table 2. Characteristics of the study gullies.

Código	X [†]	Y [†]	Z [†]	A_d (ha) [‡]	L (m) [§]	S (m/m) ^b	Plc (/100) [□]
A	337356.97	4142347.62	230.090	0.8528	15.0	0.113	0.0579
B	337359.54	4142350.85	229.760	0.8528	9.7	0.092	0.0579
C	337355.86	4142364.44	228.280	1.0863	13.6	0.090	0.0559
D	337348.34	4142377.72	226.810	1.0940	4.1	0.078	0.0281
E	337345.16	4142382.89	226.170	1.1295	4.7	0.096	0.0199
F	337338.11	4142378.84	226.450	0.0016	29.5	0.103	-0.0280
G	337343.08	4142398.51	225.240	1.6805	18.8	0.110	0.0409
H	337343.94	4142335.53	231.680	0.3119	72.3	0.111	0.0290
J	337304.67	4142297.45	238.130	0.0090	12.1	0.360	0.0286
K	337307.28	4142328.32	233.230	0.2450	132.0	0.150	0.0314
L	337280.17	4142356.91	229.690	0.3839	75.2	0.193	0.0268
M	337273.05	4142363.41	229.130	0.3420	28.6	0.165	0.0302
N	337261.85	4142312.58	237.240	0.0002	74.4	0.158	0.0158
O	337256.61	4142319.42	236.500	0.1145	33.2	0.157	0.0075
P	337253.07	4142326.93	235.610	0.0770	6.8	0.126	0.0106
Q	337258.04	4142339.12	233.190	0.0173	58.9	0.131	0.0091
R	337269.98	4142385.36	225.130	0.0900	46.8	0.236	0.0614
m				0.4875	37.4	0.145	0.0284
s				0.5208	35.0	0.069	0.0228
CV (%)				106.8	93.6	47.5	80.1
Max				1.6805	132.0	0.360	0.0614
Min				0.0002	4.1	0.078	-0.0280

[†]Coordenadas X, Y, Z UTM (30); [‡]área de desagüe en la cabecera; [§]longitud; ^bpendiente local; [□]curvatura plana ♦[†]Coordinates X, Y, Z UTM (30); [‡]drainage area at the head; [§]length; ^blocal slope; [□]flat curvature.

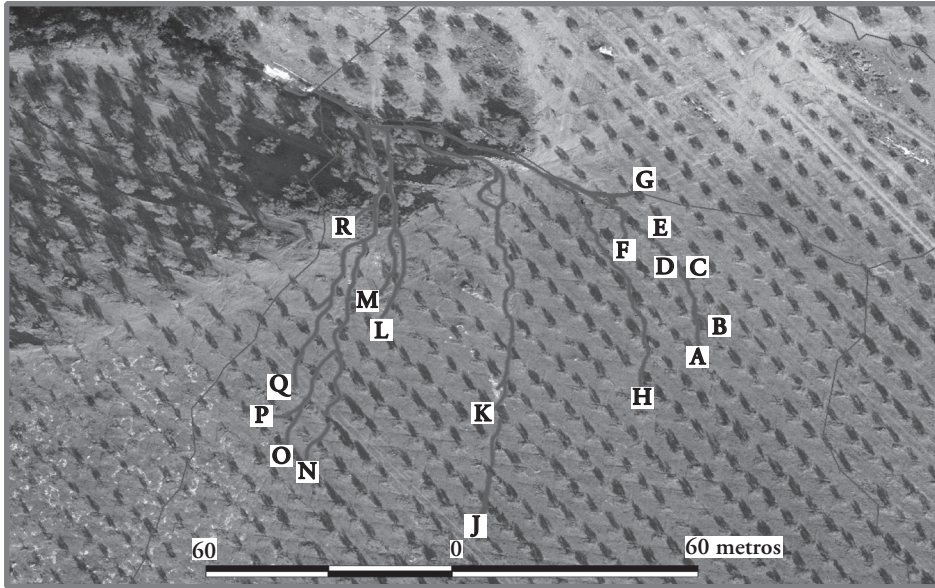


Figura 2. Cárcavas identificadas sobre la fotografía aérea y codificadas por las letras A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O, P, Q y R.

Figure 2. Gullies identified on the aerial photography and coded with the letters A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O, P, Q and R.

media de la cuenca (1.56 g cm^{-3}), el período sin operaciones de laboreo (1999-2004) y una profundidad media representativa de 15 cm.

El examen en campo permitió observar que las cárcavas M y F fueron generadas por el deterioro de las medialunas en la base de los olivos asociado a la concentración del flujo (Figura 3). Numerosos afloramientos de material parental cálcico fueron identificados en la zona de elevada densidad de cárcavas de la ladera este (Figura 3b), como en las cárcavas R, K y N, donde además hay áreas de desagüe reducidas (Cuadro 2).

7 km km^{-2} . Morgan (2005) provides as an indicator of high rates of erosion, the presence of connected streams or gullies separated 5 to 10 m from one another. In soils so shallow and limited for the development of roots, the tolerance limit value set according to potential erosion is $2.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (USDA-NRCS, 1999). Importantly, if only the soil losses associated with gullies register $1.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, environmental degradation can be severe; therefore, the strategies for improved management in the catchment should be directed to the revegetation and protection of gullies with retention elements.



Figura 3a. Pequeña cárcava generada por la acumulación de flujo en la base del árbol.

Figure 3a. Small gully generated by the accumulation of flow at the base of the tree.



Figura 3b. Vista de las laderas mostrando el material parental en superficie, asociado a la formación de cárcavas en la ladera.

Figure 3b. View of the slopes showing parental material on surface, associated to the formation of gullies on the slope

Cheng *et al.* (2007) consideran que la erosión aguda por cárcavas inicia a partir de una densidad de 7 km km^{-2} . Morgan (2005) establece como indicador de elevadas tasas de erosión la presencia de regueros o cárcavas conectados separados entre 5 y 10 m. En suelos tan someros y limitados para el desarrollo de las raíces, el valor límite de tolerancia establecido de acuerdo a la erosión potencial es $2.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (USDA-NRCS, 1999). Es importante destacar que si sólo las pérdidas de suelo asociadas a cárcavas computan $1.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, el deterioro ambiental puede ser grave; por tanto, las estrategias de mejora del manejo en la cuenca deberían ir dirigidas a la revegetación y defensa de las cárcavas con elementos de retención.

Los valores medios de A_d (0.49 ha), L (37.4 m), S (14.5 %) y Pl (0.03/100) fueron comparables a los observados por otros autores sobre distintos usos y tipos de suelo (Cuadro 3). En los estudios realizados en el área mediterránea, los valores de longitud resultaron más bajos (Capra *et al.*, 2005; Nachtergaele *et al.*, 2001). Esto podría ser explicado por la función de las medialunas en las bases de los olivos alterando los caminos naturales de flujo en ladera y favoreciendo la discontinuidad en el desarrollo de la red de cárcavas.

Distribución del ITC en la cuenca de estudio

En la Figura 4 se muestra la distribución de los valores ITC en la cuenca comprendidos entre 3 y 1000.

The mean values of A_d (0.49 ha), L (37.4 m), S (14.5 %) and Pl (0.03/100) were comparable to those observed by other authors over different uses and soil types (Table 3). In the studies conducted in the Mediterranean area, the length values were lower (Capra *et al.*, 2005; Nachtergaele *et al.*, 2001). This may be explained by the role of semicircular borders at the base of olive trees as they alter the flow of slope natural paths and favor discontinuity in the development of gully networks.

Distribution of ITC in the study watershed

The distribution of CTI values in the catchment ranging between 3 and 1000 is shown Figure 4. The maximum values are in the stream, while a CTI threshold equal to 3 was an appropriate critical value to locate the start of the gully.

Besides the visual examination proposed by Parker *et al.* (2007), Desmet and Govers (1997) suggest a numerical criterion for the location of ephemeral gullies based on equation 1 which justifies the choice of the minimum threshold value according to the quotient between the total number of pixels predicted and the percentage of pixels that are actually part of the network of gullies. In this case, according to the methodology applied with the geographic information systems, it was considered that when the polylines representing the

Cuadro 3. Atributos topográficos de cárcavas efímeras determinados en otros estudios.

Table 3. Topographic attributes of ephemeral gullies determined in other studies.

Autores	País	Escala	P (mm) [‡]	Suelo	Uso del suelo	A_d (ha) [§]	L (m) [‡]	S (%) [‡]	Pl ^{¶¶}
Cheng <i>et al.</i> (2007)	China	Microcuenca	450	Loess	Trigo	0.1	24.4	35.0	-
Vanwalleghe <i>et al.</i> (2005) [†]	Bélgica	-	750	Luvisols (loess)	Barbecho, trigo, maíz	1.5	147.6	8.0	
Vanwalleghe <i>et al.</i> (2005) ^{††}	Bélgica	-	750	Luvisols (loess)	Barbecho, trigo, maíz	1.4	34.2	13.0	
Capra <i>et al.</i> (2005)	Italia	Pequeña cuenca	400	Vertic Xerocepts	Trigo	1.2	137	-	-
Nachtergaele <i>et al.</i> (2001)	España Portugal	- -	350 550	Leptosols Leptosols	Almendro Trigo	0.1 1.2	60 157.9	27.5 12.5	- -

[†]Cárcavas poco profundas; ^{††}cárcavas profundas. [‡]precipitación media anual; [§]área de desagüe; [‡]longitud de las cárcavas; [‡]pendiente; ^{¶¶}curvatura plana ♦ [†]Shallow gullies; ^{††}deep gullies. [‡]annual mean rainfall; [§]water discharge area; [‡]gully length; [‡]slope; ^{¶¶}flat curvature.

Los valores máximos se hallan en el arroyo, mientras que un umbral de ITC igual a 3 constituyó un valor crítico adecuado para localizar el inicio de las cárcavas.

Además del examen visual propuesto por Parker *et al.* (2007), Desmet y Govers (1997) proponen un criterio numérico para la localización de cárcavas efímeras basado en la ecuación 1 que justifica la elección del valor mínimo umbral de acuerdo al cociente entre el número total de píxeles predichos y el porcentaje de píxeles que efectivamente forman parte de la red de cárcavas. En este caso, de acuerdo con la metodología aplicada con los sistemas de información geográfica, se consideró que cuando las polilíneas representativas de las cárcavas se convirtieran en matrices, sería fácil y operativo comparar la distribución real de cárcavas y las distribuciones derivadas de distintos umbrales de ITC. El valor umbral de ITC que verifique la mejor solución debería considerar tanto los píxeles o celdillas que definen realmente las cárcavas como los representados, pero que no se relacionan con cárcavas en la cuenca. Por tanto, para examinar el valor de umbral ITC más adecuado para la representación de las cárcavas, se ha definido una fracción de acierto y una fracción de efectividad. La fracción de acierto es el cociente entre los píxeles coincidentes con las cárcavas para un valor de ITC ($CoITC$)

gullies turned into matrices, it would be easy and operational to compare the actual distribution of gullies and the distributions arising from different CTI thresholds. The threshold CTI value that verifies the best solution should consider the pixels or cells that actually define the gullies as represented but that are not related to gullies in the catchment. Therefore, to examine the threshold CTI value most appropriate for the representation of the gullies, a fraction of success and a fraction of effectiveness have been set. The fraction of success is the quotient between the pixels coinciding with the gullies for a value of CTI ($CoITC$) and the total number of pixels of the gullies observed (Ob). The fraction of effectiveness is the quotient between the matching pixels ($CoITC$) and the total number of pixels predicted for the CTI threshold ($PrITC$). The fraction of effectiveness is representative of the number of predicted pixels erroneously associated with thresholds of low values of CTI, since in these cases it is possible to estimate 100 % of the gullies but with a high number of pixels scattered throughout the catchment resulting from errors. The opposite end would represent a very small group of pixels located on the gully, but which respond minimally to their full extent and do not justify the validity of the prediction.

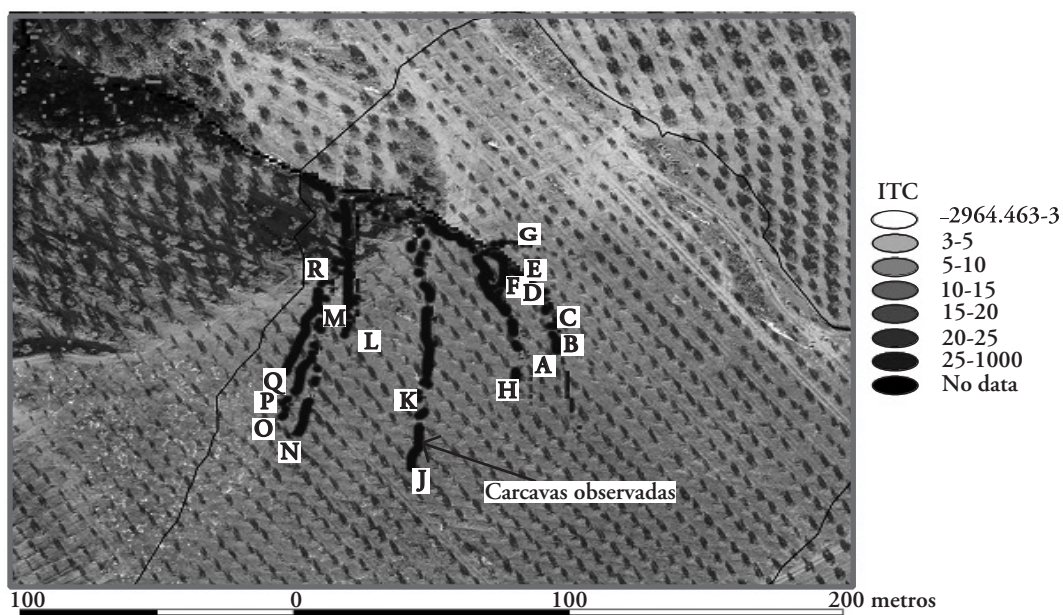


Figura 4. Distribución de la red de cárcavas y los valores de ITC en la cuenca.
Figure 4. Distribution of the gully network and CTI values in the basin

y el número total de píxeles de las cárcavas observadas (*Ob*). La fracción de efectividad es el cociente entre los píxeles coincidentes (*CoITC*) y el total de píxeles predichos para el umbral de ITC (*PrITC*). La fracción de efectividad es representativa del número de píxeles predichos erróneamente asociados a umbrales numéricamente bajos de ITC, ya que bajo estos casos es posible estimar el 100 % de las cárcavas pero con un alto número de píxeles repartidos por la cuenca que responden a errores. El extremo opuesto consistiría en la representación de un grupo muy reducido de píxeles localizados sobre las cárcavas, pero que responden mínimamente a toda su extensión y que no justifican la validez de la predicción.

Los porcentajes de acierto y efectividad para los tamaños de celda de 1.5 y 3.0 m bajos los umbrales 1, 3 y 5 se muestran en el Cuadro 4. Una evaluación inicial permitió descartar umbrales de ITC superiores a 7 ya que un grupo muy reducido de píxeles eran representados. En ambas resoluciones, el valor de ITC comprendido entre 3 y 5 proporcionó la mejor representación. Aunque, como resultado de las diferencias de resolución entre la ortofotografía y el modelo de elevación, el total de píxeles totalmente coincidentes es menor de 50 % (Figura 4), se han considerado píxeles acertados tanto los totalmente coincidentes como los parcialmente coincidentes y adyacentes. Así, la fracción de acierto es superior al 70 % para $ITC > 1$, $ITC > 3$ e $ITC > 5$. Los resultados obtenidos son compatibles con los reportados por Parker *et al.* (2007) que recopilaron umbrales de ITC para cárcavas efímeras sobre distintos suelos y cultivos en un intervalo de 5 a 62.

Finalmente, algunas cárcavas de la ladera oeste no fueron exactamente representadas (Figura 4) como

The percentages of success and effectiveness for the cell sizes of 1.5 and 3.0 m below the thresholds 1, 3 and 5 are shown in Table 4. An initial assessment enabled to rule out CTI thresholds over 7 as a very small group of pixels were represented. In both cases, the CTI value between 3 and 5 rendered the best representation. Although the total of fully matching pixels is less than 50 % (Figure 4) as a result of the resolution differences between the orthophotography and the elevation model, the pixels considered successful were those fully matching as well as those only partially and the adjacent. Thus, the fraction of success is above 70 % for $CTI > 1$, $CTI > 3$ and $CTI > 5$. The results obtained are consistent with those reported by Parker *et al.* (2007) who collected CTI thresholds for ephemeral gullies in different soils and crops in a range of 5 to 62.

Finally, some gullies on the west side were not exactly represented (Figure 4) as it was the case of N, Q, R and F. The distribution of CTI at the heads of the gullies identified is shown in Figure 5. The ABCDE gullies were treated as a single discontinuous gully given the evidence over the connection of the movement of sediments in the field. The highest values of CTI were concentrated on the eastern slope, which may justify different topographic thresholds, probably derived from local soil differences, operating at the work scale.

The CTI relations and soil properties

In the case of Kriging, the best adjustment for the role of semivariograms according to the indicators AIC, BIC and RMSE were: for the sand fraction, the linear model with plateau ($h=30$ m); for silt, clay

Cuadro 4. Índice de evaluación del valor óptimo de ITC para las condiciones de estudio.

Table 4. Evaluation index of the CTI optimal value for the study conditions.

Resolución (m)	ITC	<i>Ob</i> [†]	<i>Co ITC</i> [‡]	<i>PrITC</i> [§]	% Acierto (<i>CoITC/Ob</i> *100)	% Efectividad (<i>CoITC/PrITC</i> *100)
1.5	1	471	415	814	88	51
	3	471	376	469	80	80
	5	471	347	359	74	97
3	1	219	186	448	85	42
	3	219	155	193	71	80
	5	219	126	126	70	100

[†]Total de píxeles de las cárcavas observadas; [‡]píxeles predichos para un umbral de ITC coincidentes con las cárcavas; [§]total de píxeles predichos para un umbral de ITC ♦ [†]Total of pixels of the gullies observed; [‡]pixels predicted for a CTI threshold matching with gullies; [§]total of pixels predicted for a CTI threshold.

fue el caso de N, Q, R y F. En el Cuadro 5 se muestra la distribución del ITC en las cabeceras de las cárcavas identificadas. Las cárcavas ABCDE fueron consideradas como una única cárcava discontinua dadas las evidencias en la conexión de la circulación de sedimentos en campo. Los valores más altos de ITC se concentraron en la ladera este, lo cual puede justificar distintos umbrales topográficos, probablemente derivados de diferencias locales de suelo, que operan a la escala de trabajo.

Relaciones del ITC y las propiedades de suelo

En el caso del Krigado, el mejor ajuste de la función de los semivariogramas según los indicadores AIC, BIC y RMSE fueron: para la fracción arena, el modelo lineal con meseta ($h=30$ m); para el limo, la arcilla y el contenido de materia orgánica (MO), el modelo esférico ($h=35$ m); para el parámetro Ksat, el modelo esférico con $h=30$ m; y para la Dap, el modelo circular ($h=30$ m).

Los resultados de *MAEv* y *RMSEv* en la validación cruzada para cada variable del suelo se muestran en el Cuadro 6. Con excepción de Ksat y Dap, el ICD, evaluando los cuatro vecinos más próximos, proporcionó las predicciones con menores *MAEv* y *RMSEv*. Según Mueller *et al.* (2004), para elevadas distancias entre muestras con baja correlación, el método del ICD proporciona estimaciones más exactas como puede ser el caso de la textura y el contenido de MO.

El examen de la distribución de las cárcavas en la cuenca según los mapas de suelo obtenidos (Figura 5) mostró que las cárcavas situadas en la ladera oeste (M-R) se localizan en un área más arenosa y con menor contenido en limo y arcilla. Las variaciones del contenido de MO fueron reducidas en ambas laderas, mientras que las distribuciones de Ksat y Dap indicaron mejores condiciones de infiltración en la ladera oeste. Estos rasgos, unidos a la presencia de áreas impermeables subsuperficiales pueden justificar el incremento de presiones positivas en la matriz del suelo causadas por el flujo infiltrado, que reduzcan la resistencia a la erosión (Moore *et al.*, 1988; Poesen *et al.*, 2003). De hecho, los afloramientos petrocálcicos constituyen la base sobre las que se desarrollan en anchura, las cárcavas O, P y Q en la ladera oeste. Como contraste, en las cárcavas situadas en la ladera este (A-K), los umbrales topográficos resultaron más altos, seguramente como consecuencia de un suelo más

Cuadro 5. Valores de ITC en las cabeceras de las cárcavas para un tamaño de celda de 1.5 m.

Table 5. CTI values at the heads of gullies with a cell size of 1.5 m

Cárcava	ITC	Cárcava	ITC	Cárcava	ITC
ABCDE	66.1	K	9	O	2
F	0	L	17	P	1
G	67	M	14	Q	0
H	12	N	0	R	10
J	4				

Media = 16; desviación estándar = 23 ♦ Mean = 16; standard deviation = 23.

and the organic matter (OM) content, the spherical model ($h=35$ m); for the parameter Ksat, the spherical model with $h=30$ m, and for the Dap, the circular model ($h=30$ m).

The results of *MAEv* and *RMSEv* in the cross-validation for each soil variable are shown in Table 6. Except for Ksat and Dap, the ICD, on evaluating the four nearest neighbors, provided predictions of lower *MAEv* and *RMSEv*. According to Mueller *et al.* (2004), for high distances among samples with low correlation, the ICD method provides more accurate estimates, as may be the case of the OM texture and content.

The review of the distribution of gullies in the catchment, according to the soil maps obtained (Figure 5) showed that the gullies located on the west side (M-R) are situated in a more sandy area, with less silt and clay content. Variations in the OM content were reduced on both sides, while the distributions of Ksat and Dap indicated better conditions of infiltration on the west slope. These features, coupled with the presence of subsurface impervious areas may justify the increased positive pressure on the soil matrix caused by the infiltration flow, and reduce erosion resistance (Moore *et al.*, 1988, Poesen *et al.*, 2003). In fact, petrocalcic outcrops constitute the base on which gullies O, P and Q of the west side develop in width. In contrast, in the gullies located on the eastern slope (A-K), the topographic thresholds were higher, probably as a result of a deeper soil, more clayey and compacted and more resistant to the removal of sediments.

The correlations ($p \leq 0.05$) of the soil properties analyzed and the values of CTI at the heads of gullies are shown in Table 7. It is notable that at the heads of

Cuadro 6. Valores del error medio y error medio cuadrático derivados de la validación cruzada para las variables de suelo.
Table 6. Values of mean error and square mean error resulting from cross validation for soil variables.

Variable del suelo	Error medio cuadrático (RMSEv)		Error medio (MAEv)	
	ICD ^{§§}	Krigeado	ICD ^{§§}	Krigeado
Ar (%) [†]	6.49	6.91	4.25	4.86
L (%) [‡]	3.52	3.70	2.63	2.81
Ac (%) ^b	3.54	3.61	2.33	2.51
MO (%) [□]	0.88	0.89	0.65	0.68
Ksat (cm/h) ^{††}	4.94	4.83	3.65	3.52
Dap (g/cm ³) ^{‡‡}	0.13	0.14	0.11	0.10

[†]Fracción arena; [‡]fracción limo; ^bfracción de arcilla; [□]contenido de materia orgánica; ^{††}conductividad hidráulica saturada; ^{‡‡}densidad aparente; ^{§§}inverso del cuadrado de la distancia ♦ [†]Sand fraction; [‡]silt fraction; ^bclay fraction; [□]organic matter content; ^{††}saturated hydraulic conductivity; ^{‡‡}bulk density; ^{§§}inverse of distance square.

profundo, más arcilloso y compactado y con mayor resistencia al arranque de sedimentos.

En el Cuadro 7 se muestran las correlaciones ($p \leq 0.05$) de las propiedades del suelo analizadas y los valores de ITC en las cabeceras de las cárcavas. Es destacable como en las cabeceras de las cárcavas O, P, Q, con ITC casi nulos, se aprecian los valores más altos de Ksat y Ar y más bajos de Dap y Ac. Pese a que las correlaciones considerando todas las cárcavas no son muy elevadas, se deducen, al igual que en el examen de la distribución de las cárcavas (Figura 5), menores valores de ITC asociados a mejores condiciones de infiltración en la ladera oeste.

Las particularidades y variaciones de las propiedades del suelo deberían ser consideradas al aplicar el ITC en la predicción de la distribución de cárcavas efímeras, especialmente porque a escala de pequeña cuenca y en una misma unidad edafológica, puede haber umbrales topográficos muy distintos que respondan a diferentes dinámicas de generación de cárcavas.

Aunque a la escala de trabajo, el umbral del ITC entre 3 y 5 ha proporcionado resultados satisfactorios, se espera que a medida que se reduzcan las escalas, las consideraciones edafológicas sean cada vez más importantes. Esto permite además valorar la pequeña cuenca como una unidad espacial ideal para el análisis geomorfológico. En este sentido, hay mucho trabajo que hacer en los olivares en Andalucía para establecer mapas de zonas críticas con distintos suelos y manejos, donde más allá de cubiertas espontáneas deban establecerse trabajos de revegetación y defensa de taludes de cárcavas que reduzcan o limiten la degradación de los suelos de olivares de sierra tan abundantes.

the gullies O, P, Q, with almost no CTI, the highest values of Ksat and Ar are registered, and the lowest of Dap and Ac. Although the correlations considering all the gullies are not very high, lower CTI values are expected, associated with better infiltration conditions on the west side, the same as in the review of gully distribution (Figure 5).

The particularities and variations in soil properties should be taken into account when applying the CTI in predicting the distribution of ephemeral gullies, especially since at small-scale catchment and in the same soil unit, topography may have very different thresholds responding to different dynamics of ephemeral gully generation.

Although at a work scale, the CTI threshold between 3 and 5 has provided satisfactory results, it is expected that as the scales are reduced, soil considerations will be increasingly important. This allows also to assess the small watershed as an ideal spatial unit for geomorphological analysis. In this sense, there is much work to do in the olive groves of Andalucía to establish maps of critical areas with different soils and management systems, where in addition to the conventional measures for control of interrill erosion as the use of spontaneous covers, revegetation in ephemeral gully heads should be established to reduce or limit the degradation of the soils of the mountainous olive groves.

CONCLUSIONS

The sediment contribution of gullies is minimally represented in most hydrological models despite the high degree of soil degradation that they can

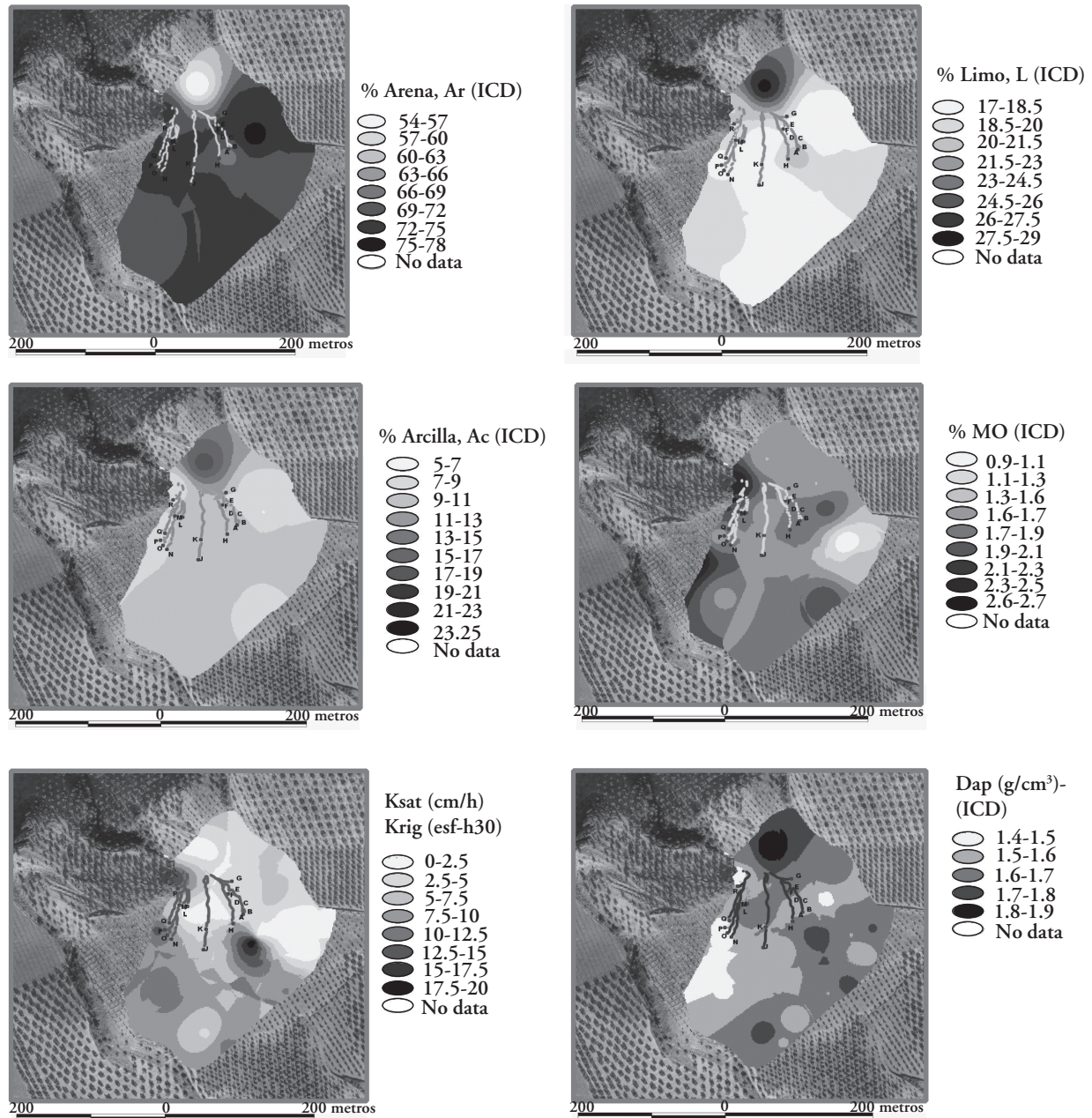


Figura 5. Distribución espacial de las propiedades del suelo en la cuenca: Ar (% , arriba-izquierda), L (% , arriba-derecha); Ac (% , centro-izquierda); MO (% , centro-derecha); Ksat (cm h^{-1} , abajo-izquierda); Dap (g cm^{-3} , abajo-derecha).

Figure 5. Spatial distribution of soil properties in the basin: Ar (% , top-left), L (% , top-right); Ac (% , center-left); MO (% , center-right); Ksat (cm h^{-1} , down- left); Dap (g cm^{-3} , down-right).

CONCLUSIONES

La contribución de cárcavas es mínimamente representada en la mayoría de los modelos hidrológicos pese al alto grado degradación de suelo que pueden llegar a suponer. Se evaluó favorablemente la utilidad del ITC para la localización de cárcavas efímeras sobre

produce. The usefulness of the CTI for the detection of ephemeral gullies on detailed elevation models was positively assessed, and numerical criteria are proposed based on the coincidence of the pixels predicted with the location of gullies and the minimizing of errors, to determine the threshold value of their representation. A reference value of

Cuadro 7. Correlaciones entre los atributos topográficos y el valor del ITC en las cabeceras de las cárcavas.
Table 7. Correlations between topographic attributes and the CTI value in the heads of gullies.

Cabeceras	ITC	Ksat (cm/h) ^{††}	Dap (g cm ⁻³) ^{§§}	MO (%) [□]	Ar(%) [†]	Ac(%) [♢]	L(%) [‡]
AB	66.1	3.72	1.58	1.61	68.94	10.67	20.41
F	-0.1	2.89	1.62	1.82	72.58	9.47	17.95
G	66.8	3.47	1.63	1.69	70.36	10.39	19.25
H	11.8	8.55	1.60	1.80	68.96	10.80	20.31
J	4.1	6.28	1.57	1.65	72.34	10.63	17.65
K	9.3	3.74	1.60	1.65	71.97	10.39	17.94
L	17.4	3.25	1.62	1.79	72.63	9.33	18.04
M	14.1	4.58	1.61	1.86	71.65	9.42	18.93
N	0.0	9.33	1.49	1.79	72.85	8.98	18.23
O	1.6	10.65	1.46	1.71	72.91	8.97	18.15
P	1.3	11.35	1.43	1.66	72.96	8.94	18.10
Q	0.3	8.20	1.52	1.79	72.89	8.81	18.30
R	9.9	10.34	1.52	2.25	71.83	8.25	19.92
Media	15.6	6.64	1.56	1.77	71.76	9.62	18.71
Desviación estándar	23.3	3.19	0.07	0.16	1.44	0.85	0.96
CV (%) ^{§§}	149.5	48.0	4.3	9.2	2.0	8.8	5.1
R (p≤0.05) ^{♢♢}	(ITC)	-0.51	0.44	-0.26	-0.72	0.52	0.59

[†] Fracción arena; [‡]fracción limo; [♢]fracción de arcilla; [□]contenido de materia orgánica; ^{††}conductividad hidráulica saturada; ^{§§}densidad aparente; ^{§§}coeficiente de variación; ^{♢♢}coeficiente de correlación atributo-ITC cabecera de la cárcava ♦ Sand fraction; [‡]silt fraction; [♢]clay fraction; [□]organic matter content; ^{††}saturated hydraulic conductivity; ^{§§}bulk density; ^{§§}variation coefficient; ^{♢♢}correlation coefficient CTI-attribute gully head.

modelos de elevación detallados y se proponen criterios numéricos basados en la coincidencia de los píxeles predichos con la localización de las cárcavas y en la minimización de errores, para determinar del valor umbral de representación de las mismas. Un valor de referencia de ITC entre 3 y 5 proporcionó los mejores resultados para resoluciones de 1.5 m y 3.0 m.

El examen de la distribución de las cárcavas en la cuenca mostró que diferencias edafológicas locales pueden limitar el potencial del ITC a la escala de estudio. Umbrales de ITC más elevados se identificaron en la ladera oeste como resultado de un suelo más profundo y arcilloso y con valores más bajos de conductividad hidráulica saturada. Este tipo de consideración puede ser muy importante en escalas más reducidas que la microcuenca.

La mejora de las estrategias de manejo del suelo en olivar, contra la erosión, requiere completar metodologías como la ecuación universal de pérdida de suelo útil para cuantificar el riesgo de erosión laminar y por regueros, con parámetros como el ITC para el análisis del riesgo de erosión por flujo concentrado. Medidas como la revegetación en la cabecera, el establecimiento de elementos transversales de retención y el no laboreo en las inmediaciones de las cárcavas,

CTI between 3 and 5 provided the best results for resolutions 1.5 m and 3.0 m.

The review of the gully distribution in the catchment showed that local soil differences may limit the potential of CTI at study scale. Higher CTI thresholds were identified on the west side as a result of deeper and more clayey soil, with lower values of saturated hydraulic conductivity. This kind of considerations can be very important at scales smaller than the micro-catchment.

Improved soil management strategies in olive groves to combat erosion require adding methodologies, like the universal equation of soil loss, that is useful to measure the risk of sheet and rill erosion, with parameters such as the CTI for risk erosion (from concentrated flow) analysis. Measures such as the revegetation of the gully heads, the establishment of cross-cutting retention elements and no-tilling in the vicinity of the gully should be included in the areas vulnerable to degradation by gullies and ephemeral gullies.

Topographic indicators such as the CTI can be integrated into water catchment management models for the localization and characterization of ephemeral gullies. Their calibration and validation

deberían incluirse en las áreas susceptibles de degradación por cárcavas y cárcavas efímeras.

Los indicadores topográficos como el ITC pueden ser integrados en modelos hidrológicos de cuenca para la localización y caracterización de cárcavas efímeras. Su calibración y validación con datos reales permitiría abordar el análisis temporal (y a largo plazo) de la pérdida de suelo con diferentes escenarios de suelo, regímenes de lluvia y manejo.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, C., y M. J. Polo. 2005. Análisis de sensibilidad de AnnAGNPS en la dinámica de herbicidas en cuencas de olivar. In: Samper C., F. J., y A. Paz G. (eds). Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. La Coruña (España). 7: 337-343.
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Automat. Contr. AC 19:716-23.
- Bagnold, R. A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. U.S. Geological Survey Professional Paper 422-I. 37 p.
- Behrens, T. 2004. DEMAT, Digital Elevation Model Analysis Tool. <http://arcscrip.esri.com/details.asp?dbid=10222> (consultado julio, 2007).
- Bingner, R. L., F. D. Theurer, and Y. Yuan. 2009. Agricultural non-point source pollution model. AnnAGNPS Technical Processes Documentation Version 5.0. USDA-ARS-NRCS, Oxford (MS, U.S.A.). pp: 170.
- Boeringa, M. 2004. Kriging 1.1. Interpolator extension for Arcview 3.2. Hydrology Department of Amsterdam Water Supply. Amsterdam, Netherlands. <http://arcscrip.esri.com/details.asp?dbid=10079> (consultado septiembre, 2007).
- Burrough, P. A., and R. A. McDonnell. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press Inc., New York. 333 p.
- Capra, A., L. M. Mazzara, and B. Scicolone. 2005. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy. Catena 59: 133-146.
- Casali, J., J. J. López, and J. V. Giráldez. 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). Catena 36: 65-84.
- Cheng, H., X. Zou, Y. Wu, C. Zhang, Q. Zheng, and J. Zhan-gyan. 2007. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China. Soil Till. Res. 94: 4-14.
- Civantos, L. 2001. La olivicultura en el mundo y en España. In: Barranco, D., R. Fernandez-Escobar y L. Rallo (eds). El Cultivo del Olivo. Mundi Prensa, Madrid. pp: 17-34.
- De Santisteban, L. M., J. Casali, and J. J. López. 2006. Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). Earth Surf. Process. Landforms 31: 487-506.
- Desmet, P. J. J., and G. Govers. 1997. Two-dimensional modeling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography. Catena 29: 283-306.
- Desmet, P. J. J., J. Poesen, G. Govers, and K. Vandaele. 1999. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies. Catena 37: 377-392.
- with real data would allow to address the temporal (and long term) analysis of soil loss under different scenarios of soil, rainfall and management regimes.
- End of the English version—
- *—
- E.S.R.I. 2000. ArcView GIS 3.2. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands U.S.A.
- Francia M., J. R., V. H. Durán Z., and A. Martínez R. 2006. Environmental impact from mountainous olive orchards under different soil-management systems (SE Spain). Sci. Total Environ. 358: 46-60.
- Garbrecht, J., and L. W. Marzt. 1999. TOPAZ: an automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization, TOPAZ Overview, USDA-ARS, 26.
- Gómez, J. A., P. Romero, J. V. Giráldez, and E. Fereres. 2004. Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain affected by soil management. Soil Use Manage. 20: 426-431.
- Gómez, J. A., T. A. Sobrinho, J. V. Giráldez, and E. Fereres. 2009. Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. Soil Tillage Res. 102: 5-13.
- Gómez, J. A., T. Vanwalleghem, and J. V. Giráldez. 2008. Preliminary results of soil erosion at different scales in an olive orchards in Southern Spain. Abstract-Meeting, European General Union Assembly 2008, EGU2008-A-03977, Vienna, Austria.
- Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York. 483 p.
- Isaaks E. H., and R. M. Srivastava. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York. 561 p.
- Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. 2003. El olivar andaluz. Servicio de Publicaciones y Divulgación, Sevilla. pp: 1-4.
- Knapen, A., J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels, and J. Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. Earth-Science Rev. 80: 75-109.
- Lafien, J. M., D. A. Watson, and T.G. Franti. 1985. Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. Proc. Fourth Int. Conf. on Soil Conservation, November 3-8, Maracay, Venezuela. pp: 798-809.
- Martinez-Casasnovas, J. A., M. C. Ramos, and M. Ribes-Dasi. 2005. On-site effects of concentrated flow erosion in vineyard fields: some economics implications. Catena 60: 129-146.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente). 2007. Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/desertificacion/programa_desertificacion/pdf/PAND_dic_web_2007.pdf (consultado diciembre, 2007).
- Moore, I. D., G. J. Burch, and D. H. Mackenzie. 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and

- the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE* 32 4: 1098–1107.
- Morgan, R. P. C. 2005. *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.) Blackwell Publishing Ltd, Malden. MA-USA. pp: 88-154.
- Mueller, T. G., N. B. Pusuluri, K. K. Mathias, P. L. Cornelius, R. I. Barnhisel, and S. A. Shearer. 2004. Map quality for ordinary kriging and inverse distance weighted interpolation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 2042-2047.
- Nachtergaele, J., J. Poesen, L. Vandekerckhove, D. Oostwoud-Wijdenes, and M. Roxo. 2001. Testing the ephemeral gully erosion model EGEM for two Mediterranean environments. *Earth Surf. Process. Land.* 26: 17–30.
- Nelson, D. W., and L. E. Sommers, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: Page, A. L., H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA Monograph No. 9. Soil Science Society of America, Madison WI, USA. pp: 539-577.
- Parker, C., C. R. Thorne, R. L. Bigner, R. Wells, and D. Wilcox. 2007. Automated mapping of the potential for ephemeral gully formation in agricultural watersheds. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Sedimentation Laboratory Research Report, Oxford, MS. 31 p.
- Philip, J. R. 1993. Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter. *Water Resour. Res.* 29: 3763-3768.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten, and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.
- Poesen, J., L. Vandekerckhove, J. Nachtergaele, D. Oostwoud-Wijdenes, G. Verstraeten, and B. Van Wesemael. 2002. Gully erosion in dryland environments. *In*: Bull, L. J., and M. J. Kirkby (eds). *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Wiley, Chichester, UK. pp: 229–262.
- Schwarz, G. 1978. Estimating the dimension of a model. *Ann Stat.* 6: 461-464.
- Smith, L. M. 1993. Investigation of ephemeral gullies in loessial soils in Mississippi. US Army Corps of Engineers. Technical Report GL-93-11. pp: 1-5.
- Soil Conservation Service. 1972. *Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Samples*. Soil Survey Report 1, U.S.D.A., Washington. 603 p.
- Taguas, E. V., A. Peña, J. L. Ayuso, Y. Yuan, and R. Pérez. 2009. Evaluating and modelling the hydrological and erosive behaviour of an olive orchard microcatchment under non-tillage with bare soil in Spain. *Earth Surf. Proc. and Land* 34: 738-751.
- Thorne, C. R., and L. W. Zevenbergen. 1990. Prediction of ephemeral gully erosion on cropland in the South-eastern United States. *In*: Boardman, J., I. D. L. Foster and J. A. Daering (eds). *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons. Chichester. 29: 447-460.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. *National Soil Survey Handbook*, title 430-VI. <http://soils.usda.gov/technical/handbook> (consultado enero de 2010).
- Vanwalleghem, T., J. Poesen, J. Nachtergaele, and G. Verstraeten. 2005. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology* 69: 76-91.
- Zevenbergen, L.W., and C.R. Thorne. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surf. Proc. Landforms* 12: 47-56.