

IMPORTANCIA DEL FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA INICIACIÓN DE CÁRCAVAS EN LA CAMPIÑA ANDALUZA

M. P. González¹, M. J. Polo², I. Masip², A. Márquez² y J. V. Giráldez²

¹ Dpt. de Suelos y Riegos, CIFA Alameda del Obispo, Apdo.3092.Córdoba. mariap.gonzalez.ext@juntadeandalucia.es

² Dpt. Agronomía. ETSIAM. Apdo 3048. Córdoba

RESUMEN. En Las laderas inclinadas con los suelos arcillosos que ocupan terrenos inclinados, dedicados al cultivo del olivo en la campiña andaluza, se forman con frecuencia regueros y deslizamientos que degeneran en cárcavas.

En muchos casos la presencia de una suela subsuperficial debida al excesivo laboreo entre los árboles provoca la formación de exceso de lluvia de tipo de saturación o dunneano, aunque las elevadas intensidades de chubascos de la zona pueden inducir también canales por exceso de lluvia de origen superficial o hortoniano. Se analizan ambas causas estudiando la distribución de regueros en una cuenca del este de la provincia de Córdoba.

Mediante fotointerpretación se identifican todos los signos de erosión de la cuenca, diferenciando las cárcavas y sus cabeceras, en cada una de las cuales se analizará el fenómeno de iniciación de canales que ha predominado durante su formación. Para ello se usarán variables como la pendiente del terreno en cada punto y su área vertiente. La identificación del proceso dominante en la generación de escorrentía permite establecer un valor umbral del esfuerzo cortante generador del canal, a partir del cual se pueden identificar las zonas más susceptibles de sufrir acarcavamiento debido a cada proceso.

ABSTRACT. Soil tillage in the steep clayey slopes of the Andalusian *campiña* induces the initiation and development of frequent gullies. Among other causes the presence of a tillage pan, generated by the excessive pass of heavy disk harrows in the olive orchards, generates a saturation rain excess, Dunnean. Simultaneously the occurrence of frequent intense showers originates hortonian rain excesses. Both runoff generation types are analyzed in this report as responsible for the gully formation in a small basin of the eastern part of the Cordoba province, in Southern Spain.

The gully network has been identified by aerial photography interpretation, and the heads of the permanent gullies have been analyzed from topographic information such as the local slope and the contributing area. The estimation of a threshold value of the shear stress responsible for the initiation of the channel for each process, Dunnean or hortonian runoff, results in a map of potential erodible zones by gully formation.

1. Introducción

La erosión del suelo en los países mediterráneos constituye una de las perores amenazas para el futuro no sólo de la Agricultura sino de la propia vida en los mismos.

La ocurrencia de las lluvias en una época en la que, tras la sequía veraniega, la protección de la vegetación es muy escasa, unido al cultivo excesivo en laderas inclinadas, favorece la pérdida de suelo y generación de sedimento que se dispersa posteriormente por la cuenca. A modo de ilustración se estima que un 74% de la superficie dedicada al olivar en Andalucía está en pendientes superiores al 7% (CAP, 2003).

El agente erosivo más importante es el agua, y si bien la erosión se manifiesta de muchas formas como impactos de gotas de lluvia, erosión entre regueros y en regueros, la formación de cárcavas está adquiriendo últimamente gran importancia (fig. 1). En los recientes años lluviosos han aparecido muchas cárcavas de nueva formación, y se han ampliado las existentes, en algunos casos enmascaradas por los agricultores con el fin de acceder más fácilmente a todas las partes de sus fincas.

¿Cómo se origina una cárcava? ¿Qué papel desempeñan en su formación la topografía, el suelo y el hombre? En este informe se exploran algunos aspectos de la formación de las cárcavas, sugiriendo algunas medidas de prevención. Se recogen aquí parte de resultados previos del equipo, especialmente de Massip (2001) y Márquez (2002).



Fig. 1. Cárcava típica de la zona de estudio.

2. Mecanismos de formación de las cárcavas

Aunque bajo el concepto de cárcava se recogen tipos muy diversos, este trabajo se limita a las cárcavas producidas por flujos superficiales y subsuperficiales producidos por las lluvias de una estación en laderas inclinadas. Partiendo de unas hipótesis simplificadoras Montgomery y Dietrich, (1994) propusieron unos valores umbrales de los principales factores topográficos, superficie de la cuenca vertiente por unidad de longitud de la curva de nivel que la delimita aguas abajo, a , y la pendiente local en la salida, S , que son los mismos factores que regulan la hidrología de la cuenca en otros modelos como el TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979). Para ello, caracterizando el flujo de escorrentía en la ladera en régimen permanente, estiman el esfuerzo cortante en la interfaz del suelo, para compararlo con la resistencia a dicho esfuerzo, suponiendo que sigue la ecuación de Coulomb en la que se combinan la cohesión entre las partículas o agregados de suelo y la fricción.

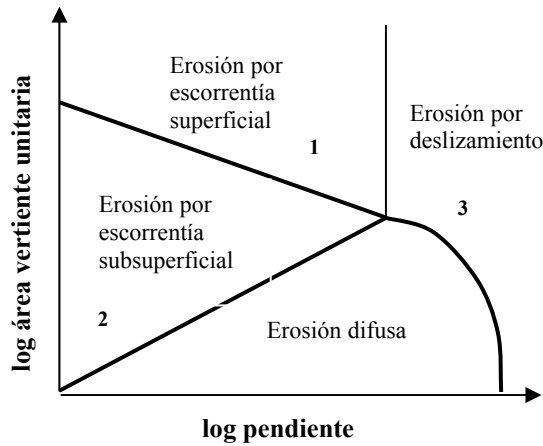


Fig. 2. Delimitación de algunas formas de erosión en función de los parámetros topográficos. Los contornos indican los umbrales de erosión por escorrentía superficial, 1, subsuperficial o por saturación del suelo, 2, y de deslizamiento, 3 (Montgomery y Dietrich, 1994).

Esencialmente esta teoría considera el flujo de escorrentía superficial, q , [L^2T^{-1}], tras separar del exceso de lluvia, $R'a$, siendo R' la intensidad, el flujo subsuperficial TS , con T , [L^2T^{-1}], como la transmisividad del suelo.

$$q = R'a - TS \quad (1)$$

Para que haya flujo superficial es preciso

$$a \geq TS/R' \quad (2)$$

El esfuerzo cortante que el flujo superficial ejerce sobre el suelo τ_b , [$ML^{-1}T^{-2}$], es

$$\tau_b = \rho ghS \quad (3)$$

siendo ρ la densidad del agua, [ML^{-3}], g la aceleración de la gravedad, [LT^{-2}], y h el calado, [L]. El calado puede ser

deducido con ayuda de alguna expresión para el flujo uniforme como la de Darcy-Weisbach, cuyo factor de fricción, f , es

$$f = 8ghS/u^2 = k.Re \quad (4)$$

siendo u , la velocidad del flujo, [LT^{-1}], Re el número de Reynolds, $Re=uh/v$, con v como la viscosidad cinemática, [L^2T^{-1}], y k y c unos coeficientes. Con todo ello el esfuerzo cortante es

$$\tau_b = \left(\frac{k\rho^3 (gS)^2 (qa/b - TS)^{2+c}}{8v^c} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Habrà erosión por escorrentía subsuperficial cuando se cumpla

$$\frac{a}{b} \geq q^{-1} \left\{ \left(\frac{8\tau_{cr}^3 v^c}{g^2 k \rho^3} \right)^{1/(2+c)} S^{-2/(2+c)} + TS \right\} \quad (6)$$

en donde τ_{cr} es el esfuerzo de corte crítico para el movimiento del suelo.

De forma análoga se estiman las condiciones umbrales para la erosión bajo flujo superficial o hortoniano, (Prosser y Abernethy, 1996),

$$\frac{a}{b} \geq q^{-1} \left\{ \left(\frac{8\tau_{cr}^3 v^c}{g^2 k \rho^3} \right)^{1/(2+c)} S^{-2/(2+c)} \right\} \quad (7)$$

Estas ecuaciones pueden servir para analizar las cárcavas de la zona.

3. Descripción de la zona de estudio

La cuenca estudiada, surcada por el Arroyo de Guruñaga, está situada al Este de la provincia de Córdoba. Pertenece a la comarca agraria del Valle del Guadalquivir. La superficie de la cuenca es aproximadamente de 24 km², y está dedicada predominantemente al olivar, aunque también hay cultivos herbáceos en secano.

La pendiente media del 12%, oscilando entre el 0% y el 58%. El relieve se puede observar en el mapa de orientaciones de la Fig. 3.

El clima es el típico mediterráneo del borde del Valle del Guadalquivir con temperaturas suaves y precipitación estacional e irregular. La precipitación media anual es 486 mm, pero en la última década la fluctuación ha sido mayor de lo usual, con dos años seguidos de precipitación próxima a 1000 mm. La elevación fluctúa entre 200 y 550 m sobre el nivel del mar.

Los suelos formados sobre margas diatomíferas marinas del Oligoceno, son arcillosos, Haploxerert típicos en el sistema de Taxonomía del USDA (Soil Survey Staff, 1999). La tabla 1 muestra algunas características representativas.

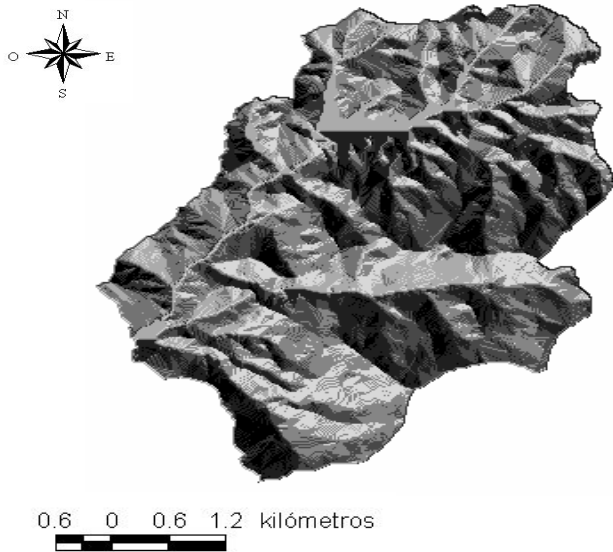


Fig. 3. Mapa de orientaciones de la cuenca Arroyo de Guruñaga

Su profundidad oscila entre 0.5 m en las partes altas, y al menos 2 m en el fondo de los valles. La elevada porción de arcilla da idea de su cohesividad. El laboreo intensivo ha formado una suela de labor, muy aparente en los cortes de las paredes de las cárcavas. Al mismo tiempo se aprecia un cambio brusco en la densidad de raíces entre la capa de labor y el subsuelo. La presencia de los árboles, raíces y tronco condiciona la distribución espacial de las propiedades del suelo. El exceso del agua de lluvia que no se infiltra en el suelo se canaliza a través de numerosos regueros, propiciado a veces por las rodadas dejadas en superficie por los remolques cargados de aceitunas y otros aperos, que suelen degenerar en cárcavas de gran tamaño, como las de la fig. 1. Los agricultores de la cuenca no han podido, pese a sus esfuerzos, mitigar las pérdidas de suelo en la misma. Se han rellenado las cárcavas con restos de poda, con árboles enteros que han caído en ellas, e incluso con lechadas de hormigón, pero hasta ahora no se ha podido reducir su crecimiento, y con ello, la pérdida de suelo.

Tabla 1. Textura del suelo, correspondiente a cinco puntos de muestreo

Punto de muestreo	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
3	.264	.314	.422	Arcillosa
6	.117	.378	.505	Arcillosa
8	.211	.291	.498	Arcillosa
9	.196	.358	.446	Arcillosa
10	.084	.320	.596	Arcillosa

Dentro de esta cuenca, se ha seleccionado una subcuenca, denominada Fuenteasnera, para un análisis más detallado. En esta subcuenca, además de tomar unas muestras de suelo y analizar algunas propiedades físicas en laboratorio, se ha

desarrollado un modelo digital de elevaciones, MDE, sobre el que se ha estimado la producción de escurrimiento. Para ello se ha dispuesto de una información pluviométrica diaria extensa de una estación de Cañete de las Torres. La desagregación de la lluvia diaria a horaria se ha efectuado usando el algoritmo de Castro (1997), y la infiltración se ha calculado con la fórmula de Green y Ampt (Massip, 2001).

Se ha analizado también la cuenca de forma secuencial a partir de los fotogramas aéreos. Para ello se dispuso de tres series de fotografías de la zona: una primera serie realizada en 1956, y cuya escala es 1:33000; un segundo grupo que data de 1984, a escala 1:40000; y por último una serie de fotografías tomadas en 1996, a escala 1:20000 (Márquez, 2002).

4. Resultados

4.1. Erosión en la cuenca

En la última racha de años lluviosos, años hidrológicos 95-96, 96-97, y 97-98, aumentó el número de pequeñas cárcavas en la cuenca, y se agrandaron las existentes, apreciables en los fotogramas del vuelo de 1956, fecha de implantación del cultivo de olivar en la zona, desplazando al de cereal. Comparando estas fotografías con las tomadas en 1984, puede observarse cómo algunas cárcavas discontinuas se han unido para formar una sola que, extendiéndose pendiente abajo, ha alcanzado el arroyo que cierra la cuenca. En esta etapa el olivar va substituyendo, poco a poco, al cereal.

Para el inventario de la red actual de cárcavas de la cuenca se ha usado una ortofoto de 1996, con 1m de resolución espacial, diferenciando las cárcavas efímeras (ver fig. 5), y las permanentes (ver fig. 6).

De un total de 162 cárcavas, equivalentes a 64,4 km de longitud (fig. 7), 42 pueden ser consideradas permanentes, con 22,5 km (fig. 6).

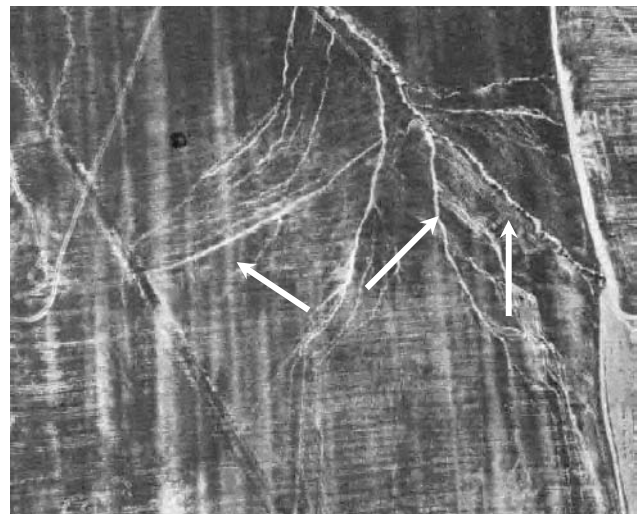


Fig. 4. Ejemplo de cárcavas efímeras

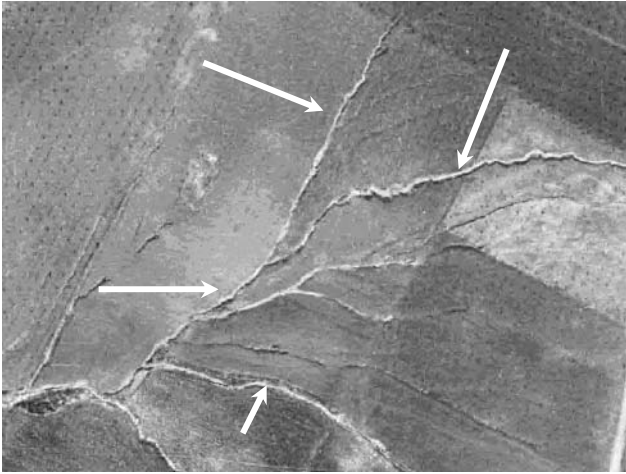


Fig. 5. Ejemplo de cárcavas permanentes



Fig. 7. Fotointerpretación de las cárcavas más estables



Fig. 6. Fotointerpretación de la erosión por cárcavas en la cuenca.

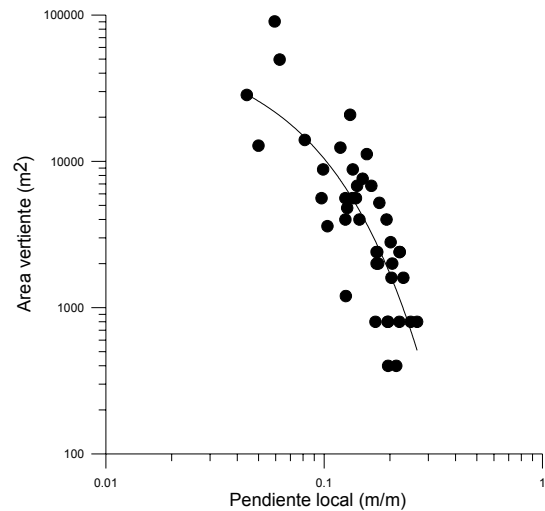


Fig. 8. Relación entre el área vertiente y la pendiente local en las cabeceras (grupo b).

La relación entre los factores topográficos se muestra en la fig. 8. Los datos de esta figura son similares a los obtenidos por Montgomery y Dietrich (1994). Aunque los procesos de crecimiento de las cárcavas, con el avance aguas arriba de las cabeceras dificultan la localización de los puntos en donde se produjo la primera incisión, que detectan el umbral topográfico de erosión, y que no coinciden a menudo con las cabeceras actuales, los resultados parecen indicar la importancia del flujo subsuperficial en la iniciación de las mismas.

Dunne (1990) indicaba que en materiales cohesivos los gradientes de infiltración tendrían que ser muy elevados para dar lugar al flujo subsuperficial e iniciar un cauce. Sin embargo la agregación que se produce en los procesos de contracción del suelo por pérdida de agua y la acción suplementaria de la labor, cortando y compactando el horizonte superficial, al tiempo que se crea la superficie poco permeable de la suela de labor favorecen el flujo subsuperficial, que es muy aparente en los bordes de las cárcavas. La acumulación del flujo superficial en las rodadas dejadas por la maquinaria, en las pendientes elevadas de la zona puede iniciar el flujo subsuperficial.

Dunne (1990) sugiere que la iniciación de canales debida a la erosión por infiltración está restringida a paisajes pobremente vegetados, condición que se cumple en esta cuenca, ya que la vegetación favorece la cohesión.

Una vez iniciadas las incisiones y los subsecuentes canales, las cabeceras avanzarán hasta que el área vertiente llegue a ser insuficiente para generar tanta saturación del suelo, que cause exfoliación, como erosión por escorrentía para eliminar el material suelto (Montgomery, 1991). Por tanto, la erosión en las cárcavas de la zona parece ser iniciada por el flujo subsuperficial combinado con el superficial.

A pesar de la imagen dantesca de las cárcavas la pérdida de suelo en la zona no supera $0.5 \text{ kgm}^{-2}\text{año}^{-1}$ o $5 \text{ Tnha}^{-1}\text{año}^{-1}$ según estimaron Márquez y col. (2002). Para ello desagregaron la lluvia diaria en horaria con el algoritmo de Castor, generaron el exceso de lluvia con el modelo de Green y Ampt, circularon el exceso de agua por la cuenca por convolución de la lluvia con el hidrograma unitario instantáneo de Troutman y Karlinger, y supusieron un flujo uniforme en los canales triangulares de las cárcavas con saturación de la carga de sedimento usando la expresión de la capacidad de transporte de Yang, lo que supone una condición límite. Los resultados coinciden con estimaciones efectuadas en una zona similar, Alora, por Schoorl y Veldkamp (2001).

4.2. Estimación del esfuerzo cortante crítico del suelo y evaluación de riesgos en Fuetasnera

A partir de la información meteorológica Massip(2001) escogió tres intensidades de lluvia en representación de los intervalos moderado, 8.6 mmh^{-1} , e intensos, 44.7 y 62.7 mmh^{-1} , respectivamente, que corresponderían, respectivamente a los chubascos más intensos de la década 1975-94 y el periodo 1995-2000. Adoptando los valores $k=1500$ y $c=-0.7$ según Prosser y Abernethy (1996), y con la ecuación (5), calculó unos valores del esfuerzo cortante crítico para iniciar las cárcavas de 7.5 y 8.6 , 26.3 y 23.2 , 32.7 y 28.5 Nm^{-2} , respectivamente para flujos superficiales y subsuperficiales con las tres intensidades de lluvia mencionadas. Estos últimos valores son muy próximos a los obtenidos por Reid (en Prosser y Abernethy, 1996), y muestran que no hay mucha diferencia entre las condiciones que propician uno u otro tipo de iniciación de las cárcavas. El notable incremento de cárcavas en los recientes periodos lluviosos, junto con el afloramiento de la suela de labor, al eliminar la erosión el horizonte superior, corroboran los resultados mostrados en la fig. 7 que identifican el flujo subsuperficial como la causa principal para el inicio del proceso, a pesar del elevado contenido de arcilla.

Comparando para cada caso el esfuerzo cortante crítico con el obtenido mediante el modelo en cada punto, se pueden estimar aquellas zonas de la cuenca susceptibles de sufrir acarcavamiento. Los resultados obtenidos no reproducen la red actual de cárcavas para intensidades moderadas de lluvia, tanto para el supuesto de flujo superficial como subsuperficial, y sobreestiman la superficie con riesgo de erosión. En el resto de los casos los resultados son muy similares y representativos de la canalización real. Por ello

se representa en la fig. 8, para el caso subsuperficial las estimaciones para intensidades de 8.6 y 44.7 mmh^{-1} .

Con esta información se puede concluir que la generación de escorrentía por flujo subsuperficial cuando se producen intensidades altas de lluvia es el proceso fundamental de iniciación de cárcavas en la zona. En la fig. 9 se representa la red actual de cárcavas junto con la zona susceptible de sufrir este proceso.

5. Conclusiones

El comportamiento del suelo labrado difiere considerablemente del suelo natural especialmente en el caso de suelos arcillosos en laderas. El flujo subsuperficial de agua desempeña un papel esencial en la iniciación y desarrollo de cárcavas. Los modelos empleados permiten predecir con suficiente fiabilidad las con riesgo de erosión en una cuenca y concentrar en ellas las medidas de manejo y protección.

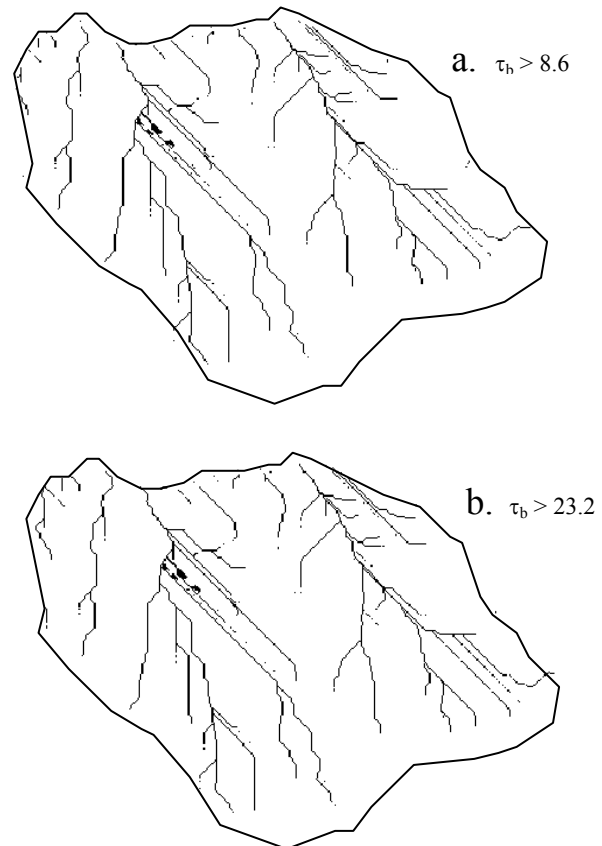


Fig. 9. Esfuerzo cortante provocado por el flujo subsuperficial en el suelo, N/m^2 , para las precipitación: (a), 8.6 mm/h ; (b), 44.7 mm/h .

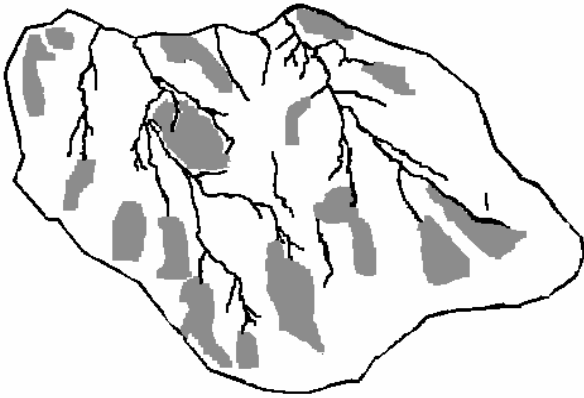


Fig. 10. Zonas de la cuenca susceptibles de sufrir acarcavamiento (sombreado) junto a la red actual de cárcavas

Referencias

Beven, K. J. y M. J. Kirkby, 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hidrol. Sci. Bull.*, 24: 43-69.
Castro, A. (1997): Influencia de la evolución temporal de la lluvia en el

diseño hidrológico: Desarrollo de un modelo de lluvia en tiempo continuo. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba.
Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, 2003. *El Olivar Andaluz*. Ed. CAP, Sevilla.
Dunne, T. 1990. Hydrology mechanics and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. En: C. G. Higgins y D. R. Coates, eds. *Groundwater geomorphology*. Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 662-A
Márquez, A. J. 2002. Análisis de la formación de cárcavas en una cuenca de olivar del Este de Córdoba. Trabajo Profesional Fin de Carrera, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba.
Márquez, A. J., Giráldez, J. V. y González, M. P. 2002. A conservative estimate of the soil loss rate in a small watershed. En: *Soil erosion patterns: COST Action 623*. Muencheberg, 10-12 Octubre
Massip, I., (2001). Erosión por cárcavas en una cuenca. Trabajo Profesional Fin de Carrera, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba.
Montgomery, D.R.; Dietrich, W.E. (1991): Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science*, vol. 255, pp. 826-830.
Montgomery, D.R.; Dietrich, W.E. (1994): Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. *Process models and theoretical geomorphology*, pp. 221-246.
Prosser, I.P.; Abernethy, B. (1996): Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process thresholds. *Water Resour. Res.*, 32: 2289-2298.
Schoorl J.M. y Veldkamp A (2001). "Linking land use and landscape process modeling: a case study for the Álora region (south Spain)". *Agric. Ecosystems. and Environment* 85: 281-292.
Soil Survey Staff, 1999, *Soil Taxonomy*, 2ª ed. USDA Agr.Hbk. 436, Washington.