

CARTOGRAFÍA SEMICUANTITATIVA DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO HOZGARGANTA (SUR DE ESPAÑA)

L. MARTÍNEZ-ZAVALA, A. JORDÁN, M. ANAYA-ROMERO, N. BELLINFANTE

Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química (Universidad de Sevilla). C/Profesor García González, 1.CP: 41012-Sevilla.
lorena@us.es

Abstract. Erosion mapping is essential for the knowledge of the distribution and geography of erosive processes as well as for its quantitative characterization. The methodology used in this paper is a basis for identifying areas with high erosion risk. It also makes possible to study the impact of future changes in environmental conditions. In this paper, the general qualitative scheme proposed by PAP/RAC (1997) is applied, modified by adding the evaluation of rainfall erosivity. Possible future changes in land cover have been considered, analysing three different situations. The results show that a great part of the studied area presents a high erosion risk due to the relief. However, the protection by vegetation is high enough to protect soil from rainfall erosion. Wrong decisions in forest management might lead to increasing potential erosion problems in the area.

Keywords: Erosion risk mapping; Mediterranean; geographical information system; rainfall erosion.

Resumen. El estudio del riesgo de la erosión es esencial para el conocimiento de la distribución geográfica de los fenómenos erosivos y para su caracterización cuantitativa. La metodología usada constituye una base para identificar las áreas en riesgo de erosión. También hace posible estudiar el impacto de futuros cambios en las condiciones ambientales. En este trabajo, se aplica el esquema cualitativo general propuesto por PAP/RAC (1997), modificado incluyendo la evaluación de la erosividad de la lluvia, dando por resultado una evaluación semicuantitativa del riesgo de erosión. Se han considerado también posibles cambios de cobertura vegetal analizando tres situaciones distintas. Los resultados demuestran que gran parte del área estudiada presenta una alta erosionabilidad, debido al relieve. Sin embargo, la cobertura vegetal permite proteger el suelo contra la erosión de la lluvia. En este caso, la toma de decisiones incorrectas en la gestión del bosque puede favorecer la aparición de procesos erosivos potenciales.

Palabras clave: Cartografía del riesgo de erosión; mediterráneo; sistema de información geográfica; erosión hídrica.

INTRODUCCIÓN

Entre los factores antrópicos que influyen en la erosión del suelo se hallan la deforestación, los incendios y el manejo de los bosques (Giovannini *et al.*, 2001; Faulkner *et al.*, 2003),

el incremento de la explotación de tierras marginales no adecuadas para la agricultura, la necesidad de mayor productividad o el abandono de las tierras de cultivo (al menos, tras un corto plazo; García-Ruiz, 1996). Todos estos factores han contribuido también a potenciar la de-

gradación del medio, especialmente en zonas sensibles. El objetivo de la evaluación del riesgo de erosión del suelo es identificar las áreas del terreno donde la máxima productividad sostenible para un determinado uso del suelo es amenazada por excesivas pérdidas de suelo (Morgan 1995). Normalmente se consideran cuatro factores principales que controlan la erosión: suelo, relieve, cubierta vegetal y

clima (Wischmeier y Smith, 1978; Morgan, 1995; Bougonoviae *et al.*, 1999; Bellinfante *et al.*, 1999).

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Hozgarganta se encuentra entre las provincias de Cádiz y Málaga (Figura 1).

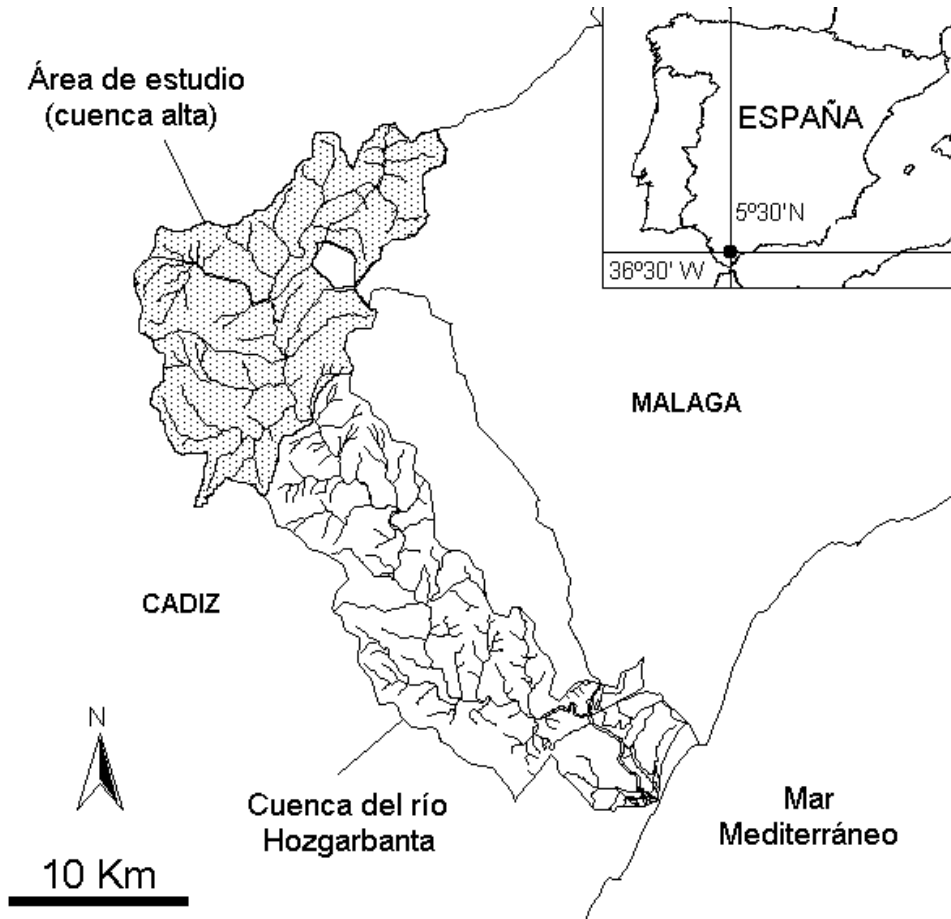


FIGURA 1. Área de estudio.

La mayoría del sustrato está formado por arenisca silíceo (Mioceno). El clima es mediterráneo, con inviernos frescos y húmedos (con una temperatura media mensual de 13.5°C y una precipitación media mensual de 155.3 mm

entre diciembre y marzo) y veranos secos y calurosos (7.8 mm y 23.4°C entre julio y septiembre). La precipitación anual oscila entre 660 y 1200 mm. La vegetación dominante está constituida por bosques de alcornoque en las

laderas orientadas al sur, y bosques mixtos de alcornoque y quejigo en las laderas orientadas al norte y el fondo de los valles.

MÉTODOS

La metodología para realizar la cartografía de estados erosivos está basada en las directrices recomendadas PAP/RAC-FAO para el estudio de la erosión en áreas costeras mediterráneas (PAP/RAC, 1997). Esto comprende tanto la observación directa en el campo como la fotointerpretación, pero también la elaboración de información cartográfica o el análisis de suelos.

Como fuente de información se utilizó (i) la cartografía de suelos realizada por Paneque *et al.* (1998), (ii) un modelo digital de elevaciones con una resolución de 20×20 m² (realizado a partir de mapas topográficos a escala 1:10,000, (iii) imágenes de satélite (Landsat TM, con una resolución espacial de 30×30 m²), (iv) estadísticas y mapas de uso del suelo y cobertura de la vegetación y (v) bases de datos climáticos georreferenciados.

Erodibilidad del suelo

La erodibilidad del suelo se determinó teniendo en cuenta el tipo de sustrato y la pendiente del terreno. Las unidades de suelo (Paneque *et al.*, 1998) fueron clasificadas en función de su comportamiento frente a la pérdida de sedimentos. La metodología propuesta por PAP/RAC (1997) para la clasificación del sustrato en diferentes clases según este criterio está a su vez basada en la elaborada por ICONA (1988). Se han tenido en cuenta las modificaciones introducidas por Martínez-Zavala (Martínez-Zavala, 2001; Martínez-Zavala *et al.*, 2002), que contemplan algunas propiedades del suelo relacionadas con la erodibilidad del horizonte superficial, como el contenido en materia orgánica o la pedregosidad superficial. La pendiente se analizó a partir de un modelo digital del terreno. Mediante un proceso de interpolación matemática se obtuvo un modelo digital de elevaciones (MDE) de 20×20 m² de resolución, a partir del cual se calculó un modelo digital de pendientes. Finalmente, se determinó la erodibilidad del suelo, según el criterio mostrado en la tabla 1.

TABLA 1. Clasificación del sustrato según su erodibilidad.

Litofacies	Tipo de suelo/material	Pendiente (%)				
		0-3	3-16	16-21	21-31	>31
A	Rocas duras compactas, no alteradas, fuertemente cementadas o suelos con costras endurecidas, afloramientos rocosos (como areniscas). Suelos muy pedregosos (cobertura de piedras mayor del 60%). Leptosoles y Regosoles en areniscas silíceas. Contenido en materia orgánica muy bajo.	1	1	2	3	4
B	Luvisoles, Cambisoles y Calcisoles en rocas fracturadas o rocas compactas moderadamente alteradas. La cobertura de piedras es alta (40-60%). El horizonte superficial está bien desarrollado y bien estructurado. El contenido en materia orgánica es moderado.	1	1	2	3	4
C	Luvisoles, Calcisoles, Calcisoles y regosoles sobre materiales ligeramente compactados, rocas sedimentarias (como pizarras, esquistos margas compactadas, etc. El porcentaje de cobertura de piedras es menor que 40%. Alto contenido de materia orgánica.	1	2	3	4	5
D	Regosoles, Calcisoles y Cambisoles sobre rocas blandas o fuertemente alteradas (como margas o arcillas). Suelos con textura fina.	1	3	4	5	5
E	Sedimentos no cohesionados, materiales detriticos. Regosoles, Phaeozems y Fluvisoles.	2	3	4	5	5

Uso del suelo y protección de la vegetación

El uso del terreno se cartografió mediante la interpretación de fotografías aéreas en blanco y negro (E 1:20.000) e imágenes de satélite en falso color (Landsat TM), así como la consulta de información cartográfica publicada. Los tipos de uso observados se incluyeron en cinco de las clases propuestas por PAP/RAC (1997): bosque (alcornocal y pinar), matorral (cistáceas y brezal), pastizal, cultivos de secano y suelo desnudo. Posteriormente se analizó la cobertura de la vegetación en cada tipo de uso, estableciendo cuatro rangos de cobertura: 0-25 %, 25-50 %, 50-75 % y 75-100 %.

Mapa de la erosividad de la lluvia

El índice de erosividad de la lluvia más usado actualmente es el índice EI₃₀, para cuya determinación se requiere información pluviográfica no disponible en el área de estudio. Varios autores han utilizado el índice de Fournier, estimado de datos de la precipitación tales como medida directa del erosividad de la lluvia o por su correlación con el factor R (Bergsma, 1980; Renard & Freimund, 1994; Oduro-Afriyie, 1996; Jordán & Bellinfante, 2000). Para el área del estudio, se utilizó la relación dada por la ecuación siguiente:

$$R = 2.56 \cdot \frac{P^2}{P} \cdot 0.56^{Z2} \cdot 1.66^{Z4}$$

donde p es la precipitación media mensual, P es la precipitación media anual, y Z2 y Z4 son factores zonales. La interpolación espacial de los valores de R calculados a partir de los datos disponibles permitió generar un mapa de erosividad de la lluvia. Posteriormente, los valores obtenidos fueron reclasificados e incorporados al modelo. Los datos fueron reclasificados en cinco clases de riesgo de erosión: 50-100, 100-125, 125-150, 150-175 y 175 hJ·m⁻²·cm·h⁻¹.

Determinación del riesgo de erosión del suelo

Para determinar los estados erosivos del terreno se desarrolló un modelo de árbol de de-

cisión, basado en los criterios de PAP/RAC (1997). El árbol de decisión incluye los parámetros uso del suelo, cobertura vegetal, protección del suelo, y erodibilidad. De este modo, se obtienen cinco clases de estados erosivos (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto).

Al considerar posibles cambios en el grado de cobertura del terreno se pueden establecer las zonas de mayor riesgo potencial de erosión. Así, además de elaborar el mapa de protección de suelo bajo las condiciones actuales (escenario a), se consideraron dos supuestos en los que la cobertura disminuye un 25% (por ejemplo: del intervalo 50-75% al 25-50%; escenario b) o un 50% (escenario c). De este modo, se puede calcular el mapa de estados erosivos en los escenarios a (estado erosivo actual), b y c (potenciales).

La información espacial sobre los estados erosivos se superpuso a la erosividad climática para obtener el riesgo de erosión hídrica utilizando el criterio que se muestra en la tabla 2.

TABLA 2. Determinación del riesgo de erosión

Estado erosivo	Factor-R				
	<100	100-125	125-150	150-175	>175
Muy bajo	1	1	1	2	3
Bajo	1	2	2	3	4
Moderado	1	2	3	4	5
Alto	2	3	4	4	5
Muy alto	3	4	5	5	5

RESULTADOS

La figura 2 muestra los mapas de litofacies, pendientes y erodibilidad del suelo. Aproximadamente el 11 % de la superficie total corresponde a Leptosoles o afloramientos rocosos de arenisca silícea, principalmente localizados sobre las zonas escarpadas de la sierra y en las cumbres (litofacies A). La cobertura de piedras es muy elevada, lo que dificulta el arrastre de sedimentos. Casi el 60% de la cuenca corresponde a Luvisoles y Cambisoles desarrollados sobre areniscas silíceas (litofacies

B). El horizonte superficial es profundo y con frecuencia posee carácter mólico, con un contenido de materia orgánica frecuentemente superior al 5 %. Los suelos incluidos en las litofacies C, D o E representan entre el 15 y el 8 % de la superficie en cada caso.

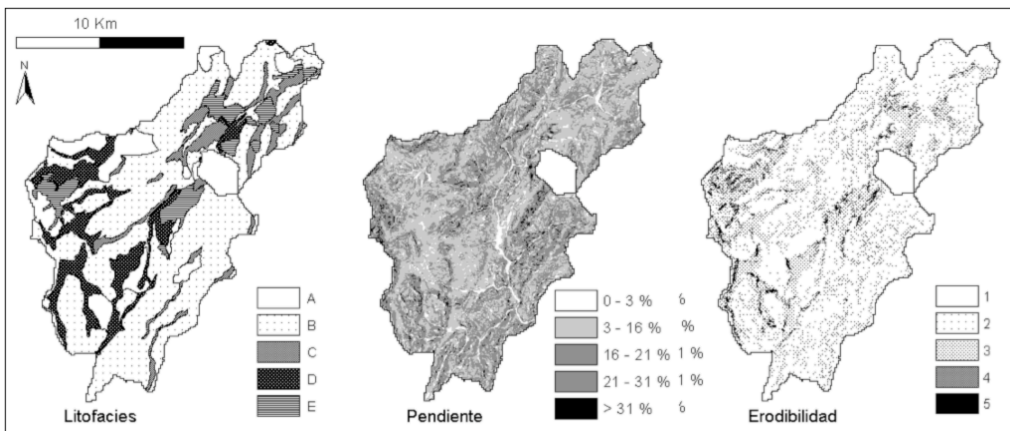


FIGURA 2. Mapas de litofacies, pendiente y erodibilidad del terreno (1: muy baja; 2: baja; 3: moderada; 4: alta; 5: muy alta).

En el mapa de pendientes (Figura 2) se aprecia la irregularidad del terreno. Casi el 40 % del terreno recibe un valor de erodibilidad igual o superior a 3. El mapa de erodibilidad del suelo (Figura 2) se obtuvo a partir de la superposición espacial de los mapas de litofacies y de pendientes.

A partir de este mapa y de los mapas de protección del suelo (escenarios a, b y c; Figura 3, izda.) se obtuvieron los mapas de estados

erosivos (Figura 3, dcha.). Se puede apreciar cómo las clases más altas permanecen prácticamente iguales, debido a su grado de cobertura vegetal inicialmente bajo. Una gran proporción de áreas con un estado erosivo bajo permanecen sin cambios, debido a que las características geomorfológicas no permiten la aparición de fenómenos erosivos (baja pendiente o baja erodibilidad).

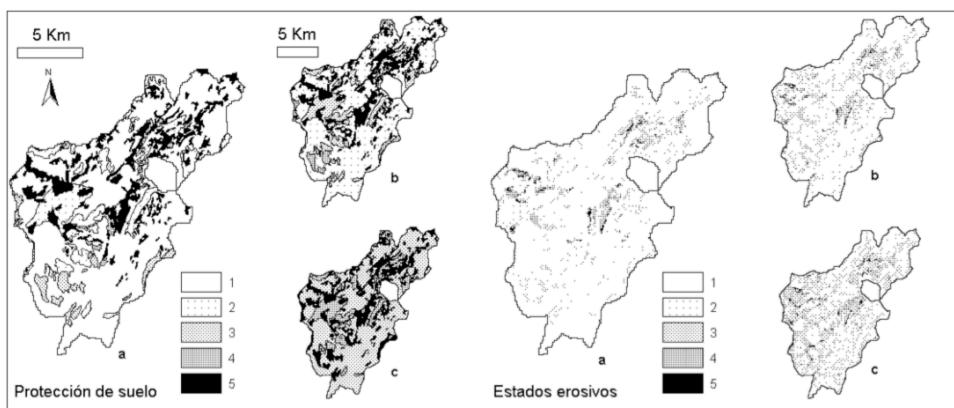


FIGURA 3. Mapas de protección del suelo (1: muy alta; 2: alta; 3: moderada; 4: baja; 5: muy baja) y de estados erosivos (1: muy bajo; 2: bajo; 3: moderado; 4: alto; 5: muy alto) para los escenarios a, b y c.

Sin embargo, una gran proporción de las unidades con estado erosivo bajo a moderado incrementan su riesgo de erosión. Estas áreas corresponden principalmente al bosque de alcornoque que cubre las laderas de la sierra. En la actualidad (escenario a), el 70 % de la superficie posee un estado erosivo muy bajo. En el escenario b este porcentaje desciende hasta el 44 %, y menos del 10 % en el escenario c. Los

estados erosivos moderado a muy alto se incrementan en un 11 y un 34 % en los escenarios b y c, respecto a la superficie inicial. El estado erosivo moderado es el que obtiene un mayor crecimiento en los escenarios b y c.

El riesgo de erosión ha sido calculado a partir del mapa de estados erosivos actual y la erosividad de la lluvia (Figura 4, izda.).

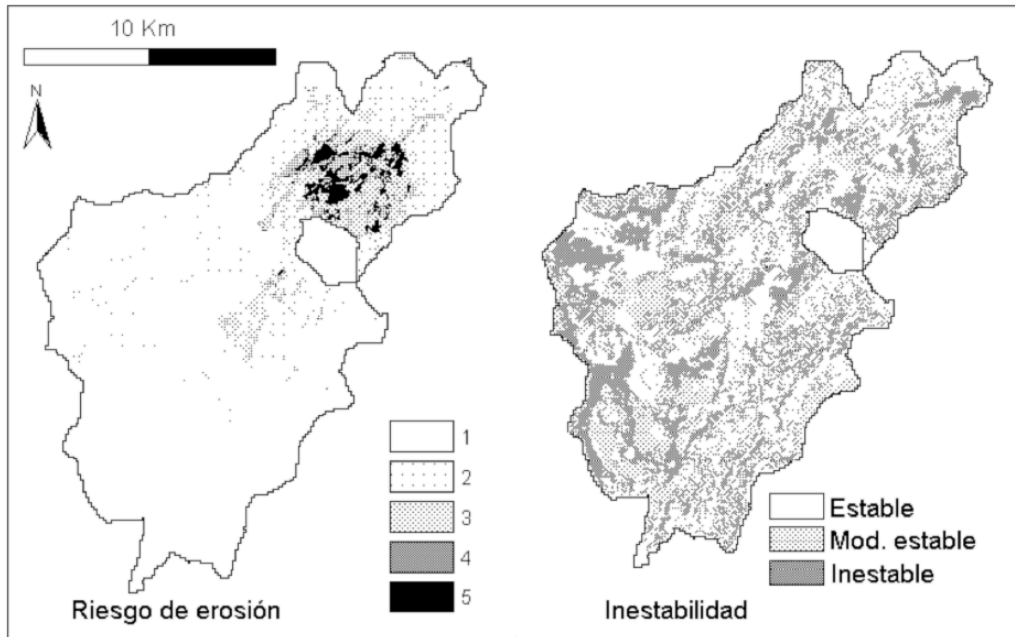


FIGURA 4. Izquierda: mapa de riesgo de erosión hídrica (1: muy bajo; 2: bajo; 3: moderado; 4: alto; 5: muy alto). Derecha: mapa de estabilidad del riesgo de erosión. El estado erosivo en áreas moderadamente estables es un nivel mayor en el escenario c que en el a. El estado erosivo en áreas inestables es dos niveles mayor en el escenario c que en el a. En las áreas estables no cambia el estado erosivo.

La mayoría del territorio posee un riesgo bajo o muy bajo de erosión. El riesgo más alto corresponde a aquellas unidades con estado erosivo elevado y alta erosividad de la lluvia. Esto ocurre en la zona más alta de la cuenca, donde la precipitación es más intensa. El 71 % del área posee un riesgo de erosión muy bajo. El 13 % de la superficie que posee un riesgo de erosión moderado a muy alto se encuentra en el extremo NE del área de estudio, donde la erosividad de la lluvia es mayor. Esto corres-

ponde, además con una zona de baja cobertura vegetal y un estado erosivo moderado a muy alto.

Mediante la comparación de los cambios de estado erosivo en los escenarios a, b y c, puede establecerse qué áreas pueden permanecer estables y en qué áreas puede aumentar el riesgo de erosión. La inestabilidad de estas áreas puede clasificarse en función del incremento de estado erosivo (Figura 4, dcha.).

DISCUSIÓN

El modelo de aproximación presentado es simple y versátil. No requiere el uso de parámetros complejos o difícilmente disponibles, como, por ejemplo, los necesarios para utilizar el modelo USLE. Este método permite analizar tanto áreas pequeñas como grandes a diferentes escalas de aproximación. Como en otros casos, el uso de modelos cualitativos no permite evaluar el error asociado a los resultados ni establecer correlaciones precisas entre diversos parámetros, pero es muy útil a la hora de delimitar espacialmente las áreas en riesgo. Esta metodología está fuertemente relacionada con la experiencia del investigador. Aunque los análisis deben ser precisos y objetivos, es necesario considerar el juicio del investigador en una aproximación sistemática y estructurada. En la práctica, una predicción muy precisa del riesgo de erosión puede alcanzarse mediante la integración de métodos cuantitativos (como la estimación de la erosividad de la lluvia) y cualitativos (Jordán, 2000; Sahin y Kurum, 2002).

Habitualmente, existe una estrecha relación entre la erosión y los rasgos físicos del paisaje. En el caso del área de estudio, el riesgo de erosión parece estar más relacionado con aspectos culturales, como el manejo de la cubierta boscosa.

El mantenimiento de la cobertura vegetal, manteniendo aprovechamientos forestales de bajo impacto como la extracción de corcho, parece esencial a la hora de gestionar el alcornoque. Las características del suelo o la inclinación de las laderas parecen tener un carácter secundario cuando la cobertura vegetal es elevada. De hecho, algunos de los suelos más profundos, desarrollados y estructurados del área de estudio se encuentran sobre terrenos de pendiente muy elevada, pero con una gran cobertura arbórea (Paneque *et al.*, 1998; Jordán, 2000).

La simulación de cambios en la cobertura es un aspecto cuyo análisis ha sido recomen-

dado en estudios similares (Le Bissonnais *et al.*, 2002). En este trabajo se ha discutido el efecto de la pérdida de cobertura vegetal sobre el riesgo de erosión, poniendo de manifiesto la debilidad del equilibrio del sistema.

El método de evaluación de la erosión propuesto por PAP/RAC (1997) es especialmente útil en zonas donde la información sobre el suelo es escasa. En estos casos, el diseño de un marco adecuado a los datos disponibles es necesario. Sin embargo, la evaluación del riesgo de erosión propuesta por PAP/RAC debe incluir parámetros relativos a la erosividad climática. Esto permite una interpretación de los resultados más cercana a la realidad. La razón es muy simple: aunque el estado erosivo sea alto, una baja erosividad pluvial no permitirá la aparición de procesos erosivos apreciables. Esto ha sido comprobado por Jordán (2000), Jordán y Bellinfante (2000) y Martínez-Zavala (2001) en sistemas mediterráneos del sur de España.

CONCLUSIONES

- El modelo utilizado no requiere el uso de parámetros complejos o difícilmente calculables, como los usados en el modelo de la USLE u otros similares.

- El método de evaluación del riesgo de erosión propuesto es particularmente útil en zonas donde existen pocos datos de suelo disponibles. En tales casos, el diseño del trabajo debe ser adecuado a los datos existentes.

- El uso de modelos cualitativos no permite evaluar el error asociado a los resultados, pero es útil a la hora de delimitar espacialmente las áreas de riesgo. Con la experiencia, se puede lograr una predicción muy precisa del riesgo de erosión mediante la integración de métodos cuantitativos (como la estimación de la erosividad pluvial) y cualitativos.

- El mantenimiento de la cobertura vegetal y de un uso forestal de bajo impacto como es la extracción de corcho parecen ser esenciales

en el manejo del alcornocal. Las características del suelo o la pendiente parecen ser secundarias cuando la cobertura vegetal es elevada. De hecho, algunos de los suelos más profundos y desarrollados en el área de estudio se encuentran sobre laderas con pendiente muy elevada y densa cobertura vegetal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores deseamos agradecer a J.C. Griesbach (FAO) y S. Husnjiak (Universidad de Zagreb) las recomendaciones y aportaciones a la metodología utilizada. Así mismo, agradecemos los comentarios y sugerencias de A. Cerdá (Universidad de Valencia), que contribuyeron a mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- Bellinfante, N., Jordán, A., Martínez-Zavala, L., y Paneque, G. (1999). Mapping of erosive status in the Campo de Gibraltar (Spain). En: 6th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate. J. Bech (Ed.) Universitat de Barcelona, Barcelona (Spain), pp. 994-996.
- Bergsma, E. (1980). Provisional rain erosivity map of the Netherlands. En: Assessment of erosion. M. De Boodst y D. Gabriels (Eds.) *John Wiley & Sons*, Chichester (GB), pp. 121-126.
- Bogunoviae, M., Husnjak, S., Kusan, S., Virdaek, Z., Sraka, M., y Mihaliae, A. (1999). Assessment of Soil Erosion by Water in the Butoniga Catchment Area in Croatia. En: 6th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate. J. Bech (Ed). Extended Abstracts. Universitat de Barcelona, Barcelona (Spain), pp: 997-999.
- Faulkner, H., Ruiz, J., Zukowskyj, P. y Downward, S. (2003). Erosion risk associated with rapid extensive agricultural clearances on dispersive materials in southeast Spain. *Environmental Science & Policy* 6:115-127.
- García Ruiz, J.M. (1996). Marginación de tierras y erosión en áreas de montaña. En: Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales. T. Lasanta y J. M. García Ruiz (eds.). Instituto de Estudios Riojanos, Sociedad Española de Geomorfología. Logroño. Pp. 33-50.
- Giovannini, G., Vallejo, R., Lucchesi, S., Bautista, S., Ciompi, S., y Llovet, J. (2001). Effects of land use y eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions, *Forest Ecology Management* 147:15-23.
- ICONA (1988). Mapas de estados erosivos. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. Madrid.
- Jordán, A., (2000). El medio físico del Campo de Gibraltar: unidades geomorfoedáficas y riesgos de erosión. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Jordán, A. y Bellinfante, N. (2000). Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología* 7-3:83-92.
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., y King, D., (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46:207-220.
- Martínez-Zavala, L. (2001). Análisis territorial de la comarca del Andévalo occidental: una aproximación desde el medio físico. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Martínez-Zavala, L., Bellinfante, N., Jordán, A., y Paneque, G. (2002). Evaluation of the erosion risk in Andevalo (SW Spain): an approach to semidetalled erosion mapping. En: Man and Soil at the Third Millennium. J. L. Rubio, R. P. C. Morgan, S. Asins, y V. Andreu (Eds.). *Geofoma Ediciones*. Logroño.

- Morgan, R. P. C., (1995). Soil erosion and conservation. Longman Group Limited. London (GB).
- Oduro-Afriyie, K., (1997). Rainfall erosivity map for Ghana. *Geoderma* 74:161-166.
- Paneque, G., Bellinfante, N., Gómez, I. A., Jordán, A., Martínez-Zavala, L., Limón, F., Ruiz, M. A., Fernández, J. A., García-Muñoz, M. T., y Taguas-Casaño, M. J. (1998). Cartografía de Unidades Geo-MorfoEdáficas del Parque Natural Los Alcornocales (E 1:50.000). Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) – Universidad de Sevilla). Sevilla.
- PAP/RAC, (1997). Guidelines for mapping and measurement of rainfall-induced erosion processes in the Mediterranean coastal areas. PAP-8/PP/GL. Priority Actions Programme Regional Activity Centre (MAP/UNEP) – FAO. Split (Croatia).
- Renard, K. G., y Freimund, J. R., (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the Revised USLE. *J. of Hydrology* 157:287-306.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Lane, L. J., y Laflen, J. M., (1996). Soil loss estimation. En: Soil erosion, conservation and rehabilitation. M. Agassi (Ed). *Marcel Dekker*: New York (EEUU), pp 169-202.
- Sahin, S., y Kurum, E., (2002). Erosion risk analysis by GIS in environmental impact assessments: a case study – Seyhan Köprü Dam construction. *Journal of Environmental Management* 66:239–247.
- Verstraeten, G., y Poesen, J., (2001). Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. *Geomorphology* 40:123-144.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. US Department of Agriculture. Agricultural Handbook, vol. 537. *USDA*. Washington DC (EEUU)