

**DINÁMICA EROSIVA Y APLICABILIDAD DE MODELOS
FÍSICOS DE EROSIÓN EN UNA CUENCA
DE MONTAÑA MEDITERRÁNEA
(RIBERA SALADA, CUENCA DEL SEGRE, LLEIDA, ESPAÑA)**

J. M. VERDÚ, R. J. BATALLA & R. M.^a POCH

*Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida
Av. Alcalde Rovira Roure, 177. 25198 Lleida (Espanya)*

ABSTRACT.- Soil surface hydrology was investigated on hillsides of the Ribera Salada watershed (Segre basin) in order to characterise the runoff/erosion dynamics and the applicability of two erosion models: E2D and EUROSEM. Three soil-vegetation units were selected: (1) oak tree and shrub cover, (2) agricultural terraces, and (3) hillslope shrub cover. Concerning fieldwork, a rain-gauge and fifteen plots with Gerlach traps were controlled during six months to monitor natural events. Six rainfall simulations were made in order to study the role of high-intensity events in runoff and erosion. Furthermore, topographic measurements, samplings and experiments were made so as to evaluate the different plots and to test the applicability of the erosion models. Main conclusions can be drawn as follows: a) low runoff and erosion rates have been registered, suggesting the predominancy of non-hortonian processes in the area, b) the E2D model was not suitable for studying recorded low-magnitude natural events and high-porosity soils, c) direct application of the EUROSEM model generates important errors; a parameter has been calibrated in order to improve the runoff calculation, and d) a great influence of soil moisture variability on runoff dynamics is pointed out for modelling purposes.

RÉSUMÉ.- On étudie la dynamique d'érosion de la surface du sol dans quelques versants de montagne de la source de la Ribera Salada (bassin du Sègre) en testant les modèles EROSION2D et EUROSEM. Trois usages du sol ont été différenciés: (1) Sous-bois du chêne pubescent, (2) terrasses agricoles et (3) bordures de buissons. En ce qui concerne le plan d'experimentation, pendant six mois des épisodes climatiques naturels ont été contrôlés à l'aide d'un pluviographe et quinze parcelles à des canaux Gerlach. D'autre part, on a étudié des épisodes de haute intensité de précipitations grâce à six simulations de pluie. En outre, ont été réalisées les mesures topographiques, les échantillons et les expérimentations nécessaires pour caractériser hydrologiquement la région et appliquer ainsi les modèles d'érosion choisis. Les conclusions

principales sont les suivantes: a) des volumes très basses d'écoulement et d'érosion ont été observées et on a pu percevoir l'importance des flux hortonniens, facteur qui conditionne l'usage de ces modèles; b) le modèle E2D ne permet pas l'étude des épisodes d'intensités aussi faibles que ceux observés, et son application devrait être limitée aux terrains les moins poreux; c) l'application directe du modèle EUROSEM conduit à des erreurs considérables. On a calibré un paramètre pour réduire l'erreur dans le calcul de l'écoulement, et d) l'étude de la variabilité de l'humidité initiale du sol est extrêmement importante dans la modélisation de ces processus.

RESUMEN.- Se estudia la dinámica de erosión por escorrentía superficial en unas laderas montañosas de la cabecera de la Ribera Salada (cuena del Segre), distinguiendo tres usos de suelo: (1) sotobosque de quejigo, (2) terrazas agrícolas y (3) márgenes de matorral. Se analiza la aplicabilidad de los modelos Erosion2D y EUROSEM. En cuanto al diseño experimental, durante seis meses se controlaron episodios naturales mediante un pluviógrafo y quince parcelas con canales Gerlach. Se realizaron, asimismo, seis simulaciones de lluvia que permitieron estudiar episodios de alta intensidad. De manera complementaria se llevaron a cabo las mediciones topográficas, los muestreos y las experimentaciones necesarias para caracterizar hidrológicamente la zona y aplicar los modelos de erosión. Como principales conclusiones se pueden señalar las siguientes: a) las tasas de escorrentía y erosión registradas fueron muy bajas, y se constató la importancia de procesos diferentes al flujo hortoniano, lo cual condiciona el uso de estos modelos, b) el modelo E2D no permite estudiar episodios de baja magnitud como los registrados, y su aplicación se debería restringir a terrenos menos porosos, c) la aplicación directa del modelo EUROSEM origina errores importantes; se ha calibrado un parámetro para reducir el error en el cálculo de la escorrentía, y d) el estudio de la variabilidad de la humedad precedente del suelo resulta de gran importancia para la modelización de estos procesos.

Keywords: Erosion, physical models, runoff, field experimentation, Segre basin, Spain.

1. Introducción

El suelo es la base para la mayoría de actividades humanas relacionadas con el medio natural. Este recurso sufre un proceso natural de pérdida, que se convierte en un problema de primera magnitud cuando la velocidad de formación (edafogénesis) es inferior a la velocidad con que se pierde (erosión). El estudio de la erosión hídrica superficial de suelos ha sido un campo donde se han prodigado los intentos de modelización desde hace varias décadas. Estos estudios inicialmente se validaron a escala de parcela agrícola, y con modelos puramente empíricos. De entre ellos, el más extendido es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) de WISCHMEIER & SMITH (1978), que da un valor aproximado anual de remoción de suelo, aunque no es recomendable para una cuantificación de la pérdida de suelo, en episodios aislados, ni para estudios a escala de cuenca.

Sin embargo, sigue habiendo escasez de experiencias en el uso de modelos de base física que puedan aplicarse en cuencas, para usos de suelo diferentes del agrícola, y a partir de episodios de precipitación concretos. En cuanto a modelos de estas características, se pueden citar los siguientes: ANSWERS (BEASLEY *et al.*, 1980), KINEROS (WOOLHISER *et al.*, 1990), WEPP (LANE *et al.*, 1989; FLANAGAN, 1990), EROSION2D (SCHMIDT, 1991) y EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1991). Por su simplicidad, en el presente estudio se ha estudiado la aplicabilidad de estos dos últimos.

El objetivo de este estudio es valorar la aplicabilidad de modelos de erosión de base física para zonas modelo representativas de los diferentes usos de suelo de la cuenca y, paralelamente, estudiar la respuesta hidrológica de la cabecera de la Ribera Salada, una cuenca de montaña media mediterránea situada en la cuenca del Segre (Lérida). La correcta elección de un modelo de erosión calibrado y validado en la zona permitiría su inclusión en posteriores estudios sobre el balance de sedimento a nivel de esta cuenca y similares en el Pre-Pirineo. En este caso dicho objetivo es de especial interés al tratarse de la principal cuenca no regulada que vierte al embalse de Rialb, en el río Segre, inaugurado en 1999. Este trabajo se sitúa en el ámbito de los estudios hidrológicos, geomorfológicos y edafológicos que se llevan a cabo en la cuenca representativa experimental de la Ribera Salada por parte del Centro Tecnológico Forestal de Cataluña y la Universidad de Lérida.

2. El medio físico

La zona de estudio se localiza en la cabecera de la Ribera Salada (Pre-Pirineo, al NO de la comarca leridana del Solsonès, municipio de Odèn), a unos 1200 m de altitud. Se trata de una ladera al pie de la Sierra de Odèn, que desciende desde la Roca de Canalda (1900 m s.n.m.) hasta el fondo del valle de la Riera de Canalda (950 m s.n.m.), principal afluente de la Ribera Salada (Figura 1). La orientación de la ladera es solana, S-SE.

El material subyacente consiste en conglomerados masivos del Oligoceno, que contribuyen a la alta porosidad y pedregosidad de la zona. El material parental consiste en conglomerados y areniscas calizas, aunque parte de las laderas están cubiertas por formaciones superficiales como coluvios de textura gruesa. El régimen de humedad es údico en la parte alta y ústico por debajo de los 1800 m aproximadamente. Los procesos edafogénicos son poco activos. Cabe destacar la descarbonatación en la parte alta, predominando Eutrochrepts típicos y líticos y la formación de horizontes cálcicos por acumulación de carbonato cálcico a partir del flujo subsuperficial en las laderas,

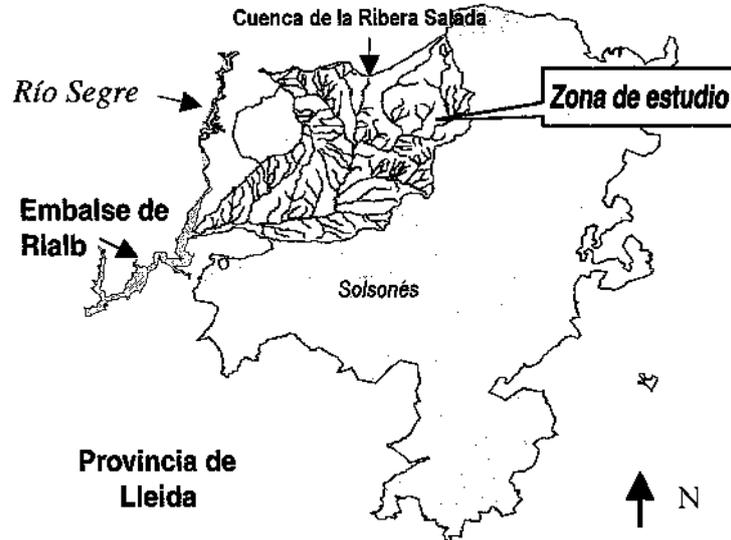


Figura 1. Localización de la zona de estudio.
 Figure 1. Location of the study area.

dando lugar a Ustochrepts cálcicos (SSS, 1998), como es el caso de la zona de estudio (ESTRUCH, 1999).

Cerca del 60% de suelos de la cuenca de Canalda tienen una profundidad enraizable menor de 50 cm, y tienen por lo tanto un contacto lítico. La capacidad de retención de agua es baja, debido a la elevada pedregosidad (>20% en más del 50% de la superficie). Bajo la cubierta forestal estos suelos se saturan fácilmente y, en consecuencia, el tipo de escorrentía en las laderas es por saturación en muchos casos. Los humus predominantes son de tipo mull, poco evolucionados, con dominancia de ácidos fúlvicos frente a húmicos (CASTELLÓ, 1998).

El clima es de tipo mediterráneo húmedo, con una precipitación anual media cercana a 800 mm y una temperatura media de 15 °C (AA.VV., 1996). La vegetación de la zona corresponde a la serie submediterránea de los quejigos (*Violo-Quercetum fagineae*), que representa una transición entre la región mediterránea y la eurosiberiana (FOLCH, 1981).

No se observaron sobre el terreno surcos o cárcavas apreciables, con lo cual la erosión esperada era de tipo laminar o bien por salpicadura, con lo cual se cumplían las condiciones de aplicación de los modelos. Los códigos que describirían el estado erosivo serían 0 y 1/2 (MORGAN, 1997).

3. Materiales y métodos

El estudio evalúa la aplicabilidad de modelos al estudio de la dinámica erosiva en laderas de la Sierra de Odèn. Se escogieron para ello dos modelos de base física, el modelo EROSION2D (E2D) y el modelo EUROSEM. De esta manera se desarrolló un estudio en paralelo. Por una parte, se instrumentó la ladera en estudio para conseguir datos de campo de escorrentía y erosión para diferentes tormentas naturales. Por otra, se fueron tomando datos del medio necesarios para aplicar los modelos, tanto constantes (topografía de la ladera, densidad aparente del suelo, pedregosidad, materia orgánica) como variables (precipitación, humedad del suelo) para los diferentes episodios. Finalmente, se obtuvieron otros datos complementarios (por infiltrometría) como apoyo para la interpretación de resultados.

Con objeto de medir la escorrentía y la erosión, se instrumentó la ladera en estudio, dividida en cinco zonas, según el uso de suelo: a) dos terrazas agrícolas en cultivo de lino (*Linum usitatissimum*), b) sus respectivos márgenes, de mayor pendiente y con predominio arbustivo (*Prunus spinosa*) y c) una zona de sotobosque de quejigo (*Quercus faginea*) con abundancia de boj (*Buxus sempervirens*). En cada una de estas zonas se dispusieron tres canales tipo Gerlach (GERLACH, 1967) a modo de repeticiones, lo cual supone un total de quince canales. En la Figura 2 se presenta una proyección del levantamiento topográfico de la zona de estudio, incluyendo la ubicación de los canales C1 a C12. Cabe señalar que las micicuencas que vertían a cada canal eran abiertas, es decir, se optó por no cerrar artificialmente las parcelas para no alterar la dinámica natural de la escorrentía y erosión.

El control y recogida de muestras, tanto de sedimento como de escorrentía, se hizo cada dos semanas. El contenido de sólidos en suspensión capturados en el depósito de cada canal Gerlach se dedujo mediante medidas con un turbidímetro de campo HANNA modelo HI-93703. El turbidímetro fue calibrado a tal efecto, con medidas de turbidez y sólidos en suspensión, dando lugar a la siguiente ecuación, estadísticamente significativa ($p < 0,01$):

$$SS = -6 \cdot 10^{-6} TU^2 + 0,007 TU - 0,034 \quad [r^2 = 0,94, N = 22]$$

donde SS indica la concentración de sólidos en suspensión (g/l) y TU es la turbidez en unidades NTU.

Paralelamente a la recogida de muestras de los canales Gerlach se tomaban datos de precipitación y de humedad del suelo. Para ello, se disponía de un pluviógrafo de balancín CAMPBELL modelo AGR100, que tomaba datos cada 5 minutos, con una precisión de 0,2 mm. El muestreo de la humedad del suelo se realizó por el método gravimétrico (PORTA *et al.*, 1993), tomando muestras en las inmediaciones de cada canal Gerlach.

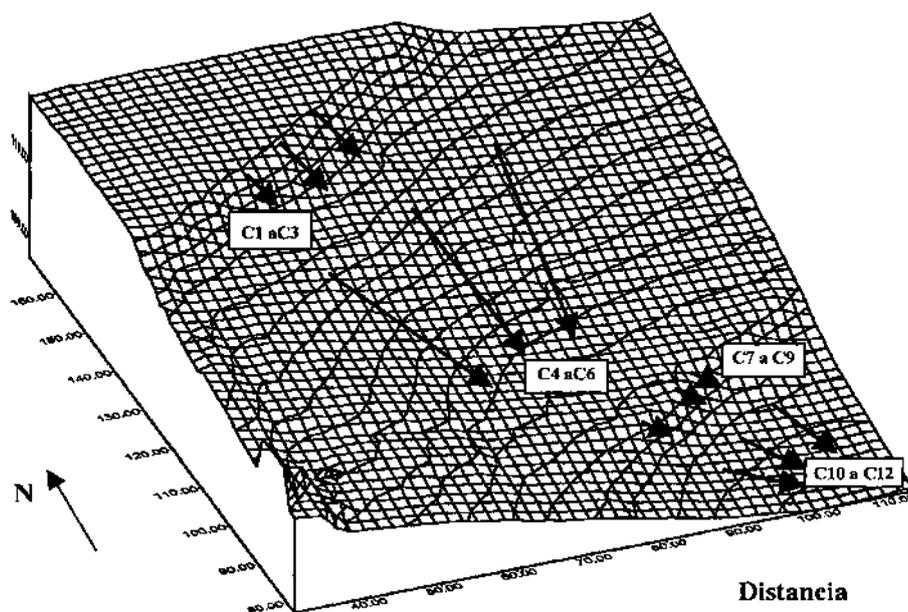


Figura 2. Proyección del levantamiento topográfico en la zona de las terrazas y márgenes (canales C1 a C12). Distancias en metros.

Figure 2. Topographic relief of terrasses and margins (Gerlach C1 to C12). Distance units in meters.

El resto de medidas, determinaciones y muestreos se realizaron una sola vez, al considerarse invariables a lo largo del periodo de estudio. En la Tabla 1 se resumen los diferentes parámetros, así como el/los modelos en que se aplican, ya sea el modelo EUROSEM (MORGAN, 1993) o bien del EROSION2D (SCHMIDT, 1991).

La falta de episodios naturales de alta intensidad y elevado periodo de retorno obligó a efectuar simulaciones de lluvia para comprobar la respuesta de estos suelos ante episodios más intensos. Se utilizó un simulador de lluvia de campo (CALVO *et al.*, 1988), y, sobre una superficie delimitada por una anillo metálico de 1 metro de diámetro, se aplicaron intensidades efectivas de entre 62 y 107 mm/h en periodos de 1 hora, lo cual corresponde a periodos de retorno superiores a 100 años. Se hicieron dos simulaciones en cada tipo de uso de suelo. Los periodos de retorno se calcularon sobre series pluviométricas del periodo 1960-1989 para las estaciones de Oliana y Berga, ajustando la función de Gumbel a los datos mediante el método de momentos.

<i>Concepto</i>	<i>Método</i>	<i>Modelo en que se aplica</i>
Altura media de las plantas	Medición directa	EUROSEM
Ángulo de los tallos con el suelo	Medición directa	EUROSEM
Cobertura vegetal (%)	Estimación visual	E2D, EUROSEM
Densidad aparente	Método del cilindro (Porta <i>et al.</i> , 1993)	E2D, EUROSEM
Factor de recesión de la infiltración	Tablas (Morgan, 1993)	EUROSEM
Infiltrometría	Método del doble cilindro (Porta <i>et al.</i> , 1993)	—
Materia orgánica	Oxidación de vía húmeda con valoración manual (Porta <i>et al.</i> , 1993)	E2D, EUROSEM
Pedregosidad superficial (%)	Estimación visual	EUROSEM
Textura	Método de la pipeta	E2D, EUROSEM

Tabla 1. Argumento de modificador desconocido. Resumen de medidas, determinaciones y muestreos efectuados

Table 1. Summary of measurements, experiments and samplings.

Finalmente, para caracterizar y delimitar la topografía de las minicuenca de cada canal Gerlach, se hizo un levantamiento topográfico de la zona, con una rejilla de puntos de entre 1 x 1 m y 2 x 2 m, según la regularidad del terreno. A continuación, mediante herramientas de GIS (concretamente el programario Surfer32 e Idrisi), se elaboró por interpolación un Modelo Digital de Elevación, que permitió una delineación automática de las minicuenca de drenaje, así como la obtención automática de perfiles, pendientes y superficies. Estos datos son necesarios tanto para aplicar los modelos de erosión, como para elaborar con los resultados índices que permitan su comparación con otros estudios.

4. Resultados del trabajo de campo

En cuanto a datos edáficos, cabe destacar la baja densidad aparente de las parcelas (1 a 1,1 t/m³) y el alto contenido en materia orgánica (hasta 6% en las parcelas agrícolas, y 10-11% en el resto).

Durante el periodo de estudio (septiembre 1997 a abril 1998), se registraron once episodios de precipitación significativos (> 3 mm), con magnitudes comprendidas entre los 5 mm y los 25,8 mm, correspondientes a un periodo de retorno de 1,2 años.

En cuanto a resultados de escorrentía y erosión, pese a la gran variabilidad de un episodio a otro y entre canales de una misma repetición, raramente se supera 1 kg/ha de erosión o 1000 l/ha de escorrentía. Sólo se consideraron fiables los datos de episodios en que para cada parcela-modelo había como mínimo dos repeticiones. Las relaciones entre las diferentes variables y para cada uso de suelo se pueden observar en la Tabla 2.

Ratios Lugar	Concepto	% Escorrentía/precipitación	Escorrentía (l/ha·mm)	Erosión (g/ha·mm)	Infiltración (mm/h)
GLOBAL	promedio	0,30	30,3	10,5	
	desv. típica	0,35	34,7	16,2	
Márgenes	promedio	0,50	50,3	4,3	80-200
	desv. típica	0,44	43,5	4,4	
Terrazas	promedio	0,06	5,9	9,1	60-90
	desv. típica	0,04	4,0	6,8	
Quejigos	promedio	0,39	39,1	25,4	900
	desv. típica	0,21	20,8	33,3	

Nota: La tasa de infiltración es el valor estabilizado de las pruebas de infiltrometría efectuadas en el campo.

Tabla 2. Relaciones entre las variables más significativas.
Table 2. Ratios between significant variables.

En general se observa una baja relación escorrentía/precipitación que concuerda con las altas tasas de infiltración estabilizada obtenidas experimentalmente en el campo. Los márgenes presentan la máxima escorrentía debido a su alta pendiente y la escasa vegetación, aunque la variabilidad es destacable, contrastando con la relativa uniformidad de las parcelas agrícolas. Sin embargo, en cuanto a erosión, las tasas más elevadas se alcanzan, en el sotobosque de quejigo, fenómeno quizá explicable por su pendiente mayor que las parcelas agrícolas y un recubrimiento vegetal arbustivo menor que en los márgenes. Considerando una precipitación anual de 850 mm, y extrapolando la relación obtenida, tenemos para la zona una tasa anual de 9 kg/año·ha de erosión y así deducimos que la zona no sufre procesos intensos de erosión.

Los resultados de las simulaciones de lluvia se recogen en la Tabla 3.

De ellos se desprende que la escorrentía fue nula en la zona de quejigos, casi nula (1% de relación precipitación/escorrentía) en la terrazas agrícolas, y variable en los márgenes (2 y 55% de coeficientes de escorrentía en las dos simulaciones). En la Figura 3 se ofrece como ejemplo el resultado de una simulación en la zona de margen, la de mayor tasa de escorrentía. Las simu-

SIMULACIÓN (canal)	SIM 1 (C14)	SIM 2 (C15)	SIM 3 (C7)	SIM 4 (C9)	SIM 6 (C10)
Tiempo (h)	2,92	1,38	1,06	1	1,75
Precipitación (mm/h)	107,6	81,8	71,4	61,8	103,8
Ini escorrentía (min)	-	-	0,5	11,3	20,0
Escorrentía (ml)	0	0	7816	226	326
Erosión (g)	0	0	170,07	0,44	0,56
Concentración (g/l)	0	0	21,8	1,9	1,7
% escorr./precipit.	0	0	55,20	1,95	0,95
Tasa escorr. (l/ha-mm)	0	0	5518,3	195,2	95,3
Tasa erosión (g/ha-mm)	0	0	120072,8	380,0	163,8
Periodo retorno (años)	>1000	>1000	712	140	>1000

Nota: Periodo de retorno estimado a partir de datos de precipitaciones diarias de las estaciones meteorológicas de Oliana y Berga para el periodo 1960- 1989.

Tabla 3. Resultados de las simulaciones de lluvia.
Table 3. Rainfall simulation results.

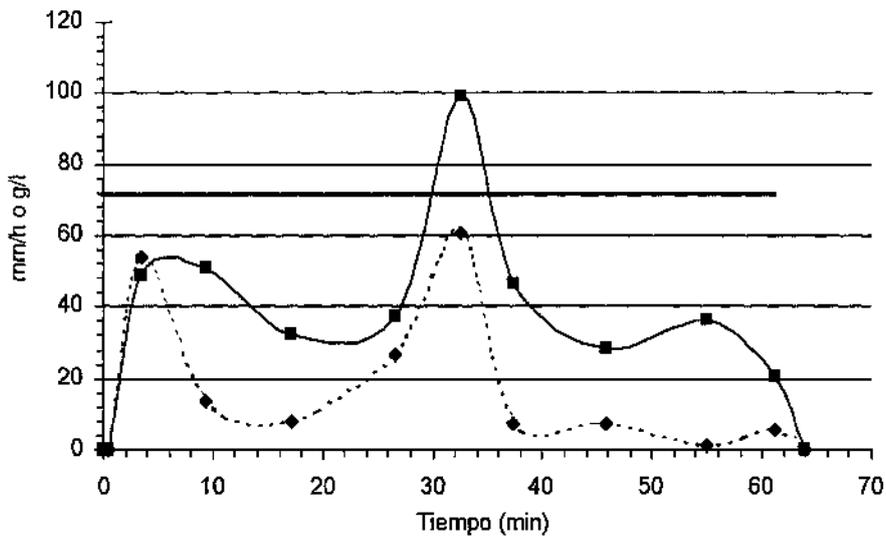


Figura 3. Gráfico de los resultados de la simulación de lluvia en el canal C7 (zona de margen).
La línea discontinua indica la escorrentía (mm/h), la línea continua el sedimento erosionado (g/l), y la línea gruesa la precipitación (mm/h).
Figure 3. Graphic results of the simulated rainfall event in channel C7 (margin land use).
Dashed line indicates runoff data(mm/h), solid line is the eroded sediment (g/l), and bold line indicates rainfall (mm/h).

laciones en las parcelas de quejigo y de margen se han comparado en la tabla 4 con un estudio similar en suelos menos porosos (MOREU, 1996), quedando patente las bajas tasas de escorrentía y también de erosión. Únicamente resulta similar la simulación del Margen 1, la cual, sin embargo, no es representativa de la dinámica global de la zona.

De los resultados (Tabla 5) se puede apuntar que el alto contenido en materia orgánica y la baja densidad aparente en la zona de quejigos, y la baja pendiente y densidad aparente en la terraza agrícola, influyen en que la escorrentía sea casi inapreciable. El hecho de que en episodios naturales sí se encontrara escorrentía en la zona de quejigos puede deberse a las diferentes condiciones de experimentación, que por ejemplo hacen que el canal Gerlach pueda recoger en parte escorrentía subsuperficial y/o no hortoniana. Por contra, la importante respuesta en una de las simulaciones de los márgenes corresponde a una zona localmente compactada o con un contacto lítico cercano, multiplicándose la respuesta de escorrentía por 20 y la de erosión por 300.

	MOREU (1996)	SIM 3	SIM 4	SIM 6
Escorrentía. (l/ha·mm)	4.200 - 6.400	5.518	195	95
Erosión (g/ha·mm)	940 -1.200	120.000	380	160

Tabla 4. Comparación de resultados de simulación de lluvia.
Table 4. Comparison of rainfall simulation results.

Variable	Márgenes	Terraza agrícola	Quejigos
Densidad aparente (t/m ³)	1,1	1,2	0,9
Materia orgánica (%)	10,4	4,4	10,8
Textura (D50, m)	0,0095	0,0084	0,0128
Clase textural	Franco-arcillosa a arcillosa	Arcillosa	Franco-arcillosa

Tabla 5. Valores medios de parámetros del suelo.
Table 5. Mean values of soil parameters.

Esta diferencia para un mismo tipo de parcela, junto al diferente comportamiento entre episodios naturales y simulados pone de manifiesto la variabilidad de los fenómenos de escorrentía/erosión, y por tanto la necesidad de trabajar con el máximo número de repeticiones. En cualquier caso, faltaría estudiar la dinámica de episodios con periodo de retorno típico del fenómeno erosivo dominante, que oscilaría entre 1,3 y 2 años (MORGAN, 1997).

Finalmente, los valores medios obtenidos de algunas variables del suelo de interés se recogen en la Tabla 5. En cuanto a la topografía de las minicuenas, la Tabla 6 recoge sus principales características geométricas.

<i>Minicuenca</i>	<i>Tipo</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Superficie (m²)</i>	<i>Pendiente (%)</i>
C1	Margen	6,0	23,6	28,6
C2	Margen	6,0	18,2	47,4
C3	Margen	6,0	33,2	48,9
C4	Terraza	41,0	272,7	23,6
C5	Terraza	15,0	52,4	17,2
C6	Terraza	13,0	46,3	21,6
C7	Margen	3,0	7,7	72,8
C8	Margen	3,0	10,7	59,9
C9	Margen	2,0	5,1	62,2
C10	Terraza	12,0	29,0	29,7
C11	Terraza	13,0	55,2	34,7
C12	Terraza	12,0	13,1	25,2
C13	Quejigos	6,0	10,2	36,6
C14	Quejigos	6,0	15,9	45,4
C15	Quejigos	6,0	16,2	40,8

Tabla 6. Principales características geométricas de las minicuenas.
Table 6. Main geometric attributes of the micro-catchments.

5. Aplicación de los modelos de erosión

5.1 Introducción a los modelos utilizados

El modelo Erosion2D (SCHMIDT, 1991), se compone de un submodelo de infiltración y un submodelo de erosión. El submodelo de infiltración se basa en las expresiones de GREEN & AMPT (1911) y la ecuación de Darcy. El submodelo de erosión, la parte más novedosa, se desglosa en dos: desagregación de partículas y transporte de partículas. La desagregación de partículas se produce cuando para un segmento de la pendiente en estudio, las fuerzas erosivas superan a las fuerzas coherentes. El cociente entre estos dos tipos de fuerzas permite el cálculo de un coeficiente E, a partir del cual se ha obtenido una expresión de la descarga de sedimento de salida, como se indica en las expresiones [1] y [2]:

$$E = \frac{\Phi_1 + \Phi_r}{\Phi_{crit}} \quad [1]$$

donde: E = coeficiente adimensional
 Φ_q = momento erosivo por impacto de las gotas de lluvia (N)
 Φ_r = momento erosivo del flujo de escorrentía (N)
 Φ_{crit} = momento crítico de depósito de sedimento

$$q_s = (1,75 \cdot E - 1,75) \cdot 10^{-4} \quad [2]$$

donde: q_s = descarga de sedimento [kg/(m·s)]

La capacidad máxima de transporte de partículas se alcanza cuando el momento crítico de depósito de sedimento ($\Phi_{p,crit}$) es igual al momento vertical del flujo ($\Phi_{q,vert}$). A partir de ahí se deriva el caudal máximo de sedimento que es capaz de transportar el flujo según la expresión [3]:

$$q_{s,max} = c_{max} \cdot \rho_p \cdot q \quad [3]$$

donde $q_{s,max}$ = caudal de sedimento [kg/(m·s)]
 ρ_p = densidad de las partículas (kg/m³)
 q = caudal de escorrentía [m³/(m·s)]
 c_{max} = concentración máxima de sedimento en suspensión [m³/m³]

Cabe añadir que el modelo Erosion2D sólo contempla la generación de flujos hortonianos y no por saturación del perfil. Tampoco contempla fenómenos como el de la interceptión, y la erosión que estima es de tipo laminar, y no por surcos o cárcavas.

El modelo EUROSEM, en cambio, es capaz de simular los procesos de interceptión, así como erosión laminar y en surcos. También incluye cálculos de direccionamiento del flujo (*runoff routing*). En cuanto a la infiltración, se basa en las ecuaciones de SMITH & PARLANGE (1978), aunque igualmente sólo permite modelizar flujos hortonianos. Los procesos erosivos contemplados son los mismos que en el Erosion2D, es decir desagregación por impacto de gotas de lluvia y por esfuerzo cortante del flujo de escorrentía.

Mediante trabajo de campo y de gabinete, tal como se ha señalado en el apartado 3, se obtuvieron los diferentes parámetros de entrada de los modelos, que incluyen datos topográficos, pluviométricos y edáficos. Entre todos ellos cabe destacar la versatilidad de la combinación de levantamiento topográfico y tratamiento SIG del Modelo Digital del terreno resultante para la obtención de los diferentes datos topográficos requeridos por los modelos de erosión. El coeficiente n de rugosidad de Manning, ante la dificultad de su estimación en campo, fue deducido a partir de la fórmula de Stricker y tablas que lo relacionan con la vegetación y uso del suelo (ENGMAN, 1986; MORGAN, 1993).

5.2 El Modelo EROSION2D

Junto con su aplicación se pretendían ajustar los valores calculados y reales de erosión y escorrentía mediante la calibración de los parámetros erosiónabilidad y factor de infiltración, respectivamente. De acuerdo con trabajos anteriores (SCHRÖDER, 1995), se tomaron valores iniciales de erosiónabilidad y del factor corrector de infiltración de 0,0005 kgm/s² y 1, respectivamente.

Por una parte, se aplicó el modelo a los 11 episodios de *precipitación natural* registrados, de los cuales se disponía de datos de campo de escorrentía y erosión para las diferentes parcelas de estudio. El resultado en todos los casos fue una predicción de menos de 0,001 m³/m de escorrentía y de menos de 1 kg/ha de material erosionado, lo cual coincide con los datos de campo obtenidos (0,00018 m³/m y 0,9 kg/ha, como máximo). Las tasas calculadas están por debajo de la magnitud mínima de salida del modelo, por lo cual éste no las puede cuantificar con exactitud, simplemente predice que la escorrentía y la erosión generadas están por debajo de ese umbral mínimo. No obstante, estas predicciones coinciden con los resultados de campo.

Por otra parte se aplicó el modelo a las *precipitaciones simuladas*, de mayor intensidad de lluvia (periodos de retorno mayores de 100 años). En este caso los resultados se deben evaluar de forma cualitativa, puesto que el modelo exige una parcela de como mínimo 1 m de longitud, mientras que los equipos disponibles sólo permitieron hacer simulaciones en miniparcels de 0,5 m. Aquí sí se puede asegurar que las predicciones no se ajustan a los resultados de campo. Éstos estaban por encima del umbral mínimo de salida del modelo, pero sin embargo el modelo predecía escorrentía y erosión nula en todos los casos, incluso reduciendo al mínimo el factor de infiltración.

Finalmente, se efectuó un análisis de sensibilidad de los principales parámetros de entrada, con objeto de determinar aquellos cuya oscilación afecta en mayor medida a las predicciones del modelo. Para ello se usó la variable adimensional *S* de medida de la sensibilidad (NEARING *et al.*, 1989), según la expresión [4]:

$$S = \left(\frac{O_2 - O_1}{O_{12}} \right) / \left(\frac{I_2 - I_1}{I_{12}} \right) \quad [4]$$

donde, *S* Medida adimensional de la sensibilidad
*I*₁ Valor inferior del parámetro de entrada
*I*₂ Valor superior del parámetro de entrada
*I*₁₂ Media de *I*₁ y *I*₂
*O*₁ Resultado de la aplicación del modelo con el valor *I*₁
*O*₂ Resultado de la aplicación del modelo con el valor *I*₂
*O*₁₂ Media de *O*₁ y *O*₂

Se escogieron para ello los datos de la minicuenca 3 (un margen de una terraza agrícola) y el episodio de mayor intensidad de precipitación, introduciendo un factor de infiltración mínimo (0,01) para obtener resultados cuantitativos que permitieran el análisis. En los otros dos tipos de parcelas en cuanto a uso del suelo no se pudo efectuar el análisis, porque incluso reduciendo al mínimo el factor de infiltración, no se alcanzaba el umbral mínimo de respuesta del modelo. Tal y como se puede apreciar en las Tablas 7 y 8, el parámetro más sensible es la humedad precedente del suelo, afectando tanto a la

Orden	Parámetro	Unidades	Rango	Sensibilidad (S)
1	Humedad precedente	%	0-100	27,02
2	Factor infiltración	-	0,01-0,11	-2,81
3	Intensidad lluvia	Mm/h	0,6-120	1,17
4	Cobertura vegetal	%	0-100	0
5	Erosionabilidad	kg·m/s ²	0,00001-0,006	0

Tabla 7. Sensibilidad de la escorrentía a diferentes parámetros de entrada en el modelo E2D.
Table 7. Runoff sensitivity to several input parameters of the E2D model.

Orden	Parámetro	Unidades	Rango	Sensibilidad (S)
1	Humedad precedente	%	0-100	16,62
2	Erosionabilidad	kg·m/s ²	0,00001-0,006	-3,43
3	Factor infiltración	-	0,01-0,11	-1,98
4	Intensidad lluvia	mm/h	0,6-120	1,41
5	Cobertura vegetal	%	0-100	-1,10

Tabla 8. Sensibilidad de la pérdida de suelo a diferentes parámetros de entrada en E2D.
Table 8. Soil loss sensitivity for several input parameters of the E2D model.

escorrentía como a la erosión. Concretamente entre 45 y 55% de humedad del suelo (véase Figura 4), el modelo presenta una fuerte variación del resultado de salida, que pasa de ser nulo a máximo, ya que a partir del 55% de humedad el modelo considera que el suelo está saturado de agua. Por otro lado, para humedades inferiores al 45 %, el modelo predice que intensidades de lluvia moderadas-bajas no generarán escorrentía ni erosión apreciables, lo cual explica que las aplicaciones del modelo a los episodios disponibles

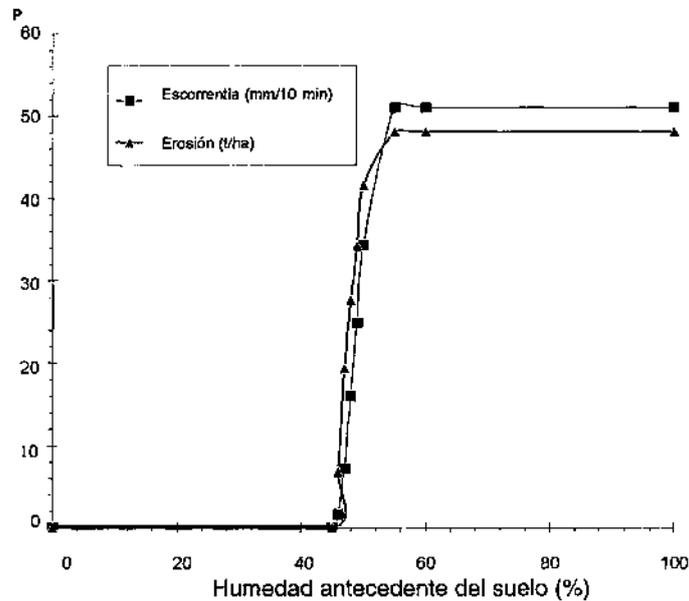


Figura 4. Análisis de sensibilidad del modelo E2D: Efecto de la humedad antecedente en el volumen de escorrentía y pérdida de suelo.
 Figure 4. E2D sensitivity analysis: Influence of antecedent soil moisture on runoff and soil loss.

hayan dado en su mayoría resultados nulos de escorrentía y erosión. El análisis de sensibilidad también muestra la importancia del factor de infiltración en la predicción de escorrentía y de la erosionabilidad en la tasa de erosión, de ahí la importancia de su calibración.

Las implicaciones en cuanto a la viabilidad de uso validación del modelo E2D en este medio concreto se pueden resumir como sigue:

- El modelo predice que no se producirá nunca escorrentía superficial apreciable en la zona, lo cual coincide con las observaciones de campo durante episodios naturales, aunque no con algunas simulaciones de alta intensidad de precipitación que produjeron cierta escorrentía y erosión
- Debido al rango de los datos, no se han podido calibrar los parámetros factor de infiltración y erosionabilidad
- El modelo sobreestima la tasa de infiltración, con lo cual, en espera de posteriores estudios que permitan una mejor calibración, se recomienda el uso de factores de infiltración menores que 1
- La humedad antecedente del suelo es el factor más sensible, con lo cual resulta de especial importancia un correcto muestreo de este parámetro.

5.3 Modelo EUROSEM

Junto con su aplicación se pretendía ajustar los valores calculados y reales de erosión y escorrentía mediante la calibración en este caso de los parámetros erosionabilidad (g/l) y conductividad hidráulica en saturación (mm/h), respectivamente, con un sentido físico parecido a los parámetros de calibración del modelo E2D. Estos parámetros, junto con la humedad antecedente, la capilaridad y la pendiente del terreno, han sido considerados como de moderada-alta sensibilidad para el modelo en estudios previos (SALVANY, 1996). A partir de tablas del manual del usuario (MORGAN, 1993) y datos de textura y uso de suelo, se determinaron los valores de referencia de conductividad hidráulica y erosionabilidad.

El rango mínimo de predicción del modelo es más detallado en este caso, siendo el mínimo 1 ml/m² de escorrentía y 1 g el total de erosión. Muchos de los episodios registrados en campo superaban este mínimo, y por tanto eran susceptibles de ser cuantificados correctamente por el modelo. De la aplicación a los episodios de *precipitación natural*, el modelo predijo 0 mm de escorrentía y 0 g de erosión en todos los casos, de lo cual se deduce que se produce un error por defecto del 100% en estas condiciones. En cuanto a las *precipitaciones simuladas*, de mayor intensidad, el modelo en este caso sí da resultados diferentes de cero, como puede observarse en las Tablas 9 y 10, y en la mayoría de casos se producen errores de predicción por exceso.

En cuanto a la calibración de los parámetros, ésta se ha llevado a cabo con desigual resultado. Así, el parámetro conductividad hidráulica en saturación, entendido como tasa de infiltración estacional, sí ha permitido ajustar los valores calculados y medidos de escorrentía, aunque de esta manera se distorsiona el sentido físico de la variable. Los valores calibrados, como se ve en la Tabla 11, oscilan entre 0,15 y 89 mm/h, y guardan una cierta proporción con los valores orientativos que figuran en el manual para las texturas de las parcelas (arcillo-

Nº simulación	Minicuenca	Escorr. real (ml)	Escorr. calculada (ml)	Error (%)
1	C14	0	31.400	∞
2	C15	0	4.773	∞
3	C7	7.800	2.290	-70,6
4	C9	226	1.170	418
6	C11	326	18.900	5.697

Tabla 9. EUROSEM: Resultados de escorrentía en las simulaciones de lluvia.
Table 9. EUROSEM: Runoff results from simulated rainfall events.

Nº simulación	Minicuenca	Erosión real (g)	Erosión calculada (g)	Error (%)
1	C14	0	7.638	∞
2	C15	0	1.320	∞
3	C7	170	1.220	617
4	C9	0,5	620	123900
6	C11	0,6	10.020	1669900

Tabla 10. EUROSEM: Resultados de pérdidas de suelo en las simulaciones de lluvia.

Table 10. EUROSEM: Soil loss results from simulated rainfall events.

Uso de suelo	Intensidad lluvia	Humedad antecedente	FMIN (mm/h)	Desv. Típica
MÁRGENES	Baja (<7 mm/h)	<30 %	0,33	0.18
		>30 %	0,66	0.09
	Alta (>60 mm/h)	-	4,9	3.6
TERRAZAS	Baja (<7 mm/h)	<30 %	0,76	0.62
		>30 %	1,48	0.05
	Alta (>60 mm/h)	-	89	-
QUEJIGOS	Baja (<7 mm/h)	<30 %	0,15	0.02
		>30 %	0,75	0.04
	Alta (>60 mm/h)	-	65	19.5

Nota: La humedad precedente ha sido medida por el método gravimétrico.

Tabla 11. EUROSEM: Calibración del parámetro FMIN.

Table 11. EUROSEM: Calibration of the FMIN parameter.

sas y franco-arcillosas), que preveían un rango de 0,1 a 38 mm/h. Esta tabla puede ser una primera aproximación a la calibración del valor de escorrentía del modelo EUROSEM para las condiciones de la zona de estudio. De ella se puede derivar que, a mayor humedad antecedente e intensidad de lluvia, mayor es el valor de la tasa de infiltración estabilizada (FMIN, mm/h).

Finalmente, no se pudo calibrar de la misma manera la tasa de erosión con el coeficiente de erosionabilidad. Por una parte, los valores de erosión hallados en campo estaban en el límite del rango mínimo del modelo (1g por episodio), con lo que el margen de maniobra era reducido para la mayoría de episodios. Por otra parte, el parámetro sólo presenta una sensibilidad moderada, con lo que se tiene que modificar considerablemente para conseguir un ajuste aceptable. Así, se obtuvieron valores de erosionabilidad inferiores a 0,001 g/J, mientras que en el modelo EUROSEM se recomienda para estas condiciones

de textura valores de 1,4 a 2,4 g/J. Por consiguiente las implicaciones en cuanto a la viabilidad del modelo EUROSEM en las condiciones estudiadas son:

- La aplicación directa del modelo sin calibrar origina errores por defecto para intensidades de lluvia bajas, y errores por exceso importantes para intensidades elevadas
- Se ha podido calibrar con cierta exactitud el volumen de escorrentía mediante la optimización del parámetro FMIN, entendido como tasa de infiltración estabilizada
- Resultan contradictorios los bajos valores de FMIN ajustados, a la vista de las altas tasas de infiltración obtenidas en la infiltrometría.

6. Conclusiones

Las conclusiones del trabajo se dividen en aquellas que hacen referencia a la dinámica de la zona de estudio y a la aplicabilidad de este tipo de modelos en esta zona y similares. En cuanto a las primeras cabe señalar:

- I. La zona de estudio no es generadora de escorrentía superficial apreciable, debido principalmente a la alta porosidad del sustrato
- II. A falta de datos de precipitaciones de intensidad moderada, la tasa de erosión anual prevista es del orden de kg/ha
- III. Se dan una serie de hipótesis que hacen pensar que los flujos superficiales registrados son no hortonianos, ya sea por saturación (en episodios de alta intensidad) o bien por salpicadura o saturaciones puntuales (episodios de baja intensidad). Esta apreciación no depende del uso de suelo estudiado. Las hipótesis se refieren a:
 - a) Altas tasas de infiltración, que difícilmente pueden ser superadas por las intensidades de lluvia que se dan con mayor frecuencia, con lo que es de suponer que la escorrentía y erosión registradas se deben a saturaciones puntuales del perfil, o bien a salpicadura
 - b) El modelo E2D predice escorrentía y erosión nula según cálculos hortonianos, con lo cual, según el modelo, los valores registrados en campo han de deberse a flujos no hortonianos
 - c) El modelo EUROSEM, también basado en cálculos hortonianos, sólo predice escorrentía si se toman valores de tasa de infiltración estabilizada (FMIN) menores que los obtenidos en ensayos bajos con respecto a los experimentos de infiltrometría de campo. Se puede interpretar que esa debería ser la tasa de infiltración estabilizada en el campo para que se produjera un flujo hortoniano de

igual magnitud a la registrada, pero como los valores de infiltración estabilizada obtenida en campo son superiores, los flujos registrados no se pueden explicar matemáticamente según la teoría hortoniana.

En cuanto a la aplicabilidad de los modelos de erosión las conclusiones son:

- I. Ni el modelo E2D ni el EUROSEM contemplan el cálculo de flujos de escorrentía no hortonianos, con lo cual el sentido físico de su aplicación en la zona de estudio es discutible
- II. El modelo E2D ha demostrado una facilidad de aplicación que hace recomendable su calibración para zonas con menores tasas de infiltración, donde haya más probabilidades de que se originen flujos de tipo hortoniano
- III. La flexibilidad del modelo EUROSEM ha permitido calibrarlo, con ciertas limitaciones. La exhaustividad de los parámetros de entrada hacen recomendable su aplicación para evaluar efectos de diferentes prácticas de conservación de suelos
- IV. La precisión en el muestreo de la humedad antecedente del suelo resulta fundamental para la correcta aplicación de estos modelos, puesto que es uno de los parámetros de mayor sensibilidad.

Agradecimientos. Agradecemos en primer lugar la ayuda de todas las personas que colaboraron en el trabajo de campo bajo duras condiciones invernales. También la ayuda de José A. Martínez de la Universidad de Lleida en el apartado de SIG. Asimismo, el apoyo técnico por parte del Centro Tecnológico Forestal de Catalunya en Solsona y del GRAM (*Grup de Recerca Ambiental Mediterrània*) de la Universidad de Barcelona.

Referencias

- AA.VV. (1996). *Atles climàtic de Catalunya: Termopluviometria*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- BEASLEY, R. P., HUGGINS, L. F. & MONKE, E. J. (1980). *ANSWERS- A model for watershed planning*. Transactions ASAE, 23(4): 938-944.
- CALVO, A.; GISBERT, B.; PALAU, E. & ROMERO, M. (1988). *Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción*. En SALA, M. & GALLART, F. (eds.): *Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos*. SEG Monografía 1: 6-15.

- CASTELLÓ, M. (1998). *Estudi de la matèria orgànica: anàlisi de casos en el Solsonès*. Trabajo Final de Carrera. Ingeniería Técnica en Explotaciones Forestales. Universitat de Lleida.
- ENGMAN, E.T. (1986). *Roughness coefficients for routing surface runoff*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112 (1), 39-53.
- ESTRUCH, J. (1999). *Informació del territori i càlcul de l'escolament superficial mitjançant el model HEC-1 aplicació al mapa de sòls 1:50.000 de la Conca de Canalda (Solsonès)* Proyecto Final de Carrera inédito. Ingeniería de Montes, Universitat de Lleida
- FLANAGAN, D. C. (1990). *WEPP second editon. Water Erosion Prediction Project- Hillslope profile model. Documentation corrections and additions*. NSERL Rep. No.4. West Lafayette, USDA-ARS.
- FOLCH GUILLÉN, R. (1981). *La vegetació dels Països Catalans*. Ketres Editora, Barcelona.
- GERLACH, T. (1967). *Hillslope troughs for measuring sediment movement*. Rev. Geomorph. Dynamique 4: 173.
- GREEN, W. H. & AMPT, G. A. (1911). *Studies on soil physics. Part I: The flow of air and water through soils*. Journal of Agricultural Sciences, 4 (1): 1-24.
- LANE, L. J. & NEARING, M. A. (1989). *USDA- Water Erosion Prediction Project (WEPP): Hillslope profile version. Profile model documentation*. West Lafayette, USDA ARS.
- MOREU, S. (1996). *Estudio mediante un simulador de lluvia de los efectos sobre el suelo de un incendio, en un área de ambiente semiárido*. Trabajo Final de Carrera, Ingeniería Técnica Agrícola, Escuela Universitaria Politécnica de Huesca, (inédito)
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N. & RICKSON, R. J. (1993). *EUROSEM: A user guide- Version 2*. Silsoe College. Cranfield University
- MORGAN, R. P. C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- NEARING, M. A.; ASCOUGH, L. D. & CHAVES, H. M. L. (1989). *WEPP model sensitivity analysis*. En: LANE, L. J. & NEARING, M. A. (eds.): *USDA- Water Erosion Prediction Project (WEPP): Hillslope profile version. Profile model documentation*. West Lafayette, USDA ARS, 14.1-14.33.
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M. & RODRÍGUEZ, R. (1993) *Laboratori d'edafologia*. Universitat Politècnica de Catalunya- ETSEAL. Departament de Meteorologia i Ciència del Sòl.
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M. & ROQUERO, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- SALVANY, M. C. (1996). *Anàlisi de sensibilitat d'un model d'erosió. EUROSEM: European Soil Erosion Model*. Tesina de licenciatura, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, (inédita)

- SCHMIDT, J. (1991). A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement* 19: 101-109.
- SCHRÖDER, A. (1995). *Simulation of Soil Erosion Processes with Physically-based Modelling Approaches: An Assessment*. Tesina de licenciatura. Departamento de Geografía Física. Freie Universität Berlin.
- SMITH, R. E. & PARLANGE, J-Y. (1978). *A parameter-efficient hydrologic infiltration model*. *Water Resources Research* 14(3): 533-538.
- SSS (Soil Survey Staff) (1998). *Keys to Soil Taxonomy*. USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington.
- VERDÚ, J. M. (1998). *Dinàmica erosiva i anàlisi de sensibilitat dels models EROSION2D i EUROSEM a la capçalera de la Ribera Salada (Solsonès)*. Proyecto Final de Carrera inédito. Ingeniería de Montes, Universitat de Lleida.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook, 282. Washington, D.C.
- WOOLHISER, D.A.; SMITH, R.E. & GOODRICH, D.C. (1990). *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and Users Manual*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.