



DISEÑO EXPERIMENTAL MEDIANTE LLUVIA SIMULADA PARA EL ESTUDIO DE LOS CAMBIOS EN LA EROSIÓN DEL SUELO DURANTE LA TORMENTA

*Experimental design with a rainfall simulator
to study the erosion changes within storm*

M. Martínez-Mena⁽¹⁾, R. Abadía⁽²⁾, V. Castillo⁽¹⁾ y J. Albaladejo⁽¹⁾

(1) *Departamento de Conservación de Suelos y Agua. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Campus Universitario de Murcia. Espinardo 30100-Murcia. Apartado de correos, 4195-30080. Murcia. España. E-mail: Mmena@cebas.csic.es Fax: 968-396213*

(2) *Universidad Miguel Hernández. E.P.S. de Orihuela. Departamento de Ingeniería División Ingeniería Agroforestal. Ctra. de Beniel, km 3,2. 03312 - Orihuela (Alicante).*

Resumen: Se presenta el diseño de una experiencia realizada en campo con lluvia simulada para el estudio de los cambios que se producen durante la tormenta en ciertas propiedades superficiales (rugosidad y resistencia mecánica) y físicas (densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, porosidad) del suelo. La experiencia se desarrolla en una zona agrícola semiárida del Sureste peninsular (Murcia), en parcelas experimentales de 4 m² sobre dos tipos de suelos de diferente litología: coluvios calizos del Cuaternario y margas del Terciario. Los cambios en las propiedades estudiadas durante la tormenta fueron más evidentes en los suelos margosos que en los suelos desarrollados sobre coluvios calizos. Las relaciones entre estos cambios con la energía cinética de la lluvia fueron también más significativas en los suelos de margas. Los resultados indicaron que el diseño experimental fue válido para el estudio de los cambios en las propiedades de la superficie y del suelo durante la tormenta.

Palabras clave: simulador de lluvia, erosión del suelo, energía cinética, propiedades físicas del suelo, cambios durante la tormenta.

Abstract: The experimental design developed to study the changes within storm in some surface (roughness and shear strength) and physical soil properties (bulk density, saturated hydraulic conductivity and porosity) is presented in this paper. The experience was carried out with a rainfall simulator on experimental plots (4m²) in an agricultural area located in South East of Spain. Two soils with different lithology were selected: Tertiary marls and Quaternary colluvial deposits. The results indicated that the experimental design and rainfall simulator were successful to study the changes occurred in the soil during the rainfall and kinetic energy was found to be the best indicator of the changes produced during the storm, especially on marly soils.

Key words: rainfall simulator, soil erosion, kinetic energy, soil physical properties, changes within storm.



Martínez-Mena, M., Abadía, R., Castillo, V. y Albaladejo, J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *Rev. C. & G.*, 15 (1-2), 31-43. © SEG. AEQUA. GEOFORMAEdiciones

1. Introducción

La susceptibilidad de los suelos a la generación de escorrentía y erosión es una propiedad dinámica

que se ve afectada por los cambios que se producen en el suelo durante una tormenta. Estos cambios afectan a propiedades hidráulicas como la infiltración y la conductividad hidráulica; a características

superficiales del suelo como la rugosidad superficial y al desarrollo del sellado y encostramiento. Todas estas modificaciones «dentro de la tormenta» contribuyen a un incremento en el potencial erosivo de la escorrentía y a una mayor probabilidad del desarrollo de surcos y cárcavas. Aunque estos procesos operan «in situ», condicionan la cantidad total de sedimento exportado a áreas más extensas y al inicio y evolución de la red de cárcavas y barrancos.

La estimación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica requiere, pues, el estudio del cambio en las propiedades del suelo y de la superficie durante la tormenta. De esta forma, es necesario el desarrollo de modelos de erosión del suelo que integren las características dinámicas de las propiedades físicas del suelo durante la lluvia. Esta aproximación dinámica no se incluye en la mayoría de los modelos de erosión desarrollados en la actualidad, los cuales consideran las variables relacionadas con la erosionabilidad del suelo de forma estática, invariantes durante la tormenta.

En este artículo se presenta un diseño experimental, a escala de campo, para el estudio de la dinámica de los procesos que tienen lugar en el suelo durante la tormenta así como los primeros resultados del mismo. La experiencia forma parte del proyecto de Investigación «Modelling within storm soil erosion dynamic» (MWISED) cuyo objetivo es la definición matemática de la evolución temporal de las propiedades del suelo durante la tormenta y su inclusión en un modelo de simulación dinámico para predecir la erosión del suelo y la escorrentía superficial a nivel de evento.

La experiencia se localiza en el Sureste de España, Murcia (Fuente Librilla; 37°53'04" Norte, 1°25'10" Oeste), en un área caracterizada climáticamente como Mediterráneo semiárido, sobre un suelo agrícola dedicado al cultivo de limoneros. Para llevar a cabo los experimentos se seleccionaron dos zonas con diferente litología (coluvios calizos del Cuaternario y margas del Terciario). Los objetivos propuestos hicieron necesaria la construcción de un simulador de lluvia. Este aparato opera sobre parcelas de 4 m² y permite realizar predicciones de gran detalle al generar la lluvia con las características deseadas.

2. Diseño del simulador de lluvia

2.1 Estructura

La figura 1 muestra la estructura del simulador y los detalles de montaje.

La estructura consiste en un bastidor cuadrado de 2.5 m de lado, soportado por cuatro patas a 3.60 m de altura máxima. La estructura está construida con perfiles redondos de aluminio hueco de 40 mm de diámetro exterior y 1 mm de espesor, unidos entre sí por enlaces de PVC de 40 mm de diámetro nominal. Cada barra de aluminio tiene una longitud de 1.25 m acoplándose en un terminal con rosca macho y en el otro un manguito de unión mixto (detalle B). Ambos enlaces se ensamblan al tubo de aluminio mediante remaches. La estructura se monta roscando las barras, resolviéndose las esquinas mediante codos de 90° y tres «T» mixtas de 40 mm de diámetro nominal (detalles A y C). Dos de las piezas de PVC de las esquinas tienen una extensión en forma de T para permitir unir otro módulo si así se deseara (detalle A). El bastidor cuadrado está atravesado por un tubo transversal sobre el que se sujeta la boquilla. La boquilla se une al grupo motobomba mediante una manguera de presión.

La estructura tiene 2 patas telescópicas y dos fijas para lograr la simulación de lluvia en zonas con pendiente. Las patas telescópicas están formadas por tres tubos de longitudes variables: dos superiores fijos de 1.25 m, iguales que los del resto de la estructura, y el otro de 1.30 m y de 35 mm diámetro exterior que se introduce por el interior del tubo superior, y cuya posición se regula con una palometa roscada sobre el manguito de unión mixto de PVC (detalle D). El extremo de cada pata se remata con una punta de lanza de teflón para que se pueda clavar parcialmente en el suelo.

Cuatro tensores anclados a las esquinas aseguran la estabilidad de la estructura. El simulador se cubre con un plástico para evitar los efectos del viento sobre la lluvia simulada.

2.2 Boquillas

Se seleccionaron las boquillas que reproducen más adecuadamente las características de la lluvia natural (Navas *et al.*, 1990). Las boquillas fueron de la marca Spraying Systems Co.: 1) 3/8GG20W y 2)



Figura 1. Esquema de la estructura del simulador de lluvia.
 Figure 1. Layout of the rainfall simulator structure

1/3HH35W, para generar lluvias con intensidades entre 33 mm h^{-1} y 60 mm h^{-1} respectivamente. Las boquillas 3/8GG20W tienen una capacidad de 10.21 l min^{-1} para 1 bar de presión mientras que las boquillas 1/3HH35W alcanzaron a la misma presión una capacidad de 17.46 l min^{-1} . Ambas boquillas presentan una superficie mojada cuadrada lo cual se adecua a la parcela diseñada de $2 \times 2 \text{ m}$.

2.3 Suministro de agua

El equipo de bombeo está formado por un grupo motobomba portátil accionado por un motor de gasolina de 2 tiempos a 7000 rpm, de la marca Jard modelo 7/35. La potencia máxima es de 1,1 CV, y es capaz de suministrar un caudal de 120 l min^{-1} a una presión de 3 bares.

El agua, tanto en los experimentos de campo como en el laboratorio es agua de riego con una buena calidad química ($\text{pH}=6.89$ y conductividad eléctrica= $412 \text{ micromhos cm}^{-1}$).

3. Características de la lluvia simulada

La calibración de las boquillas del simulador se realizó en el laboratorio previamente a las experiencias de campo.

3.1 Intensidad y uniformidad de la lluvia

La intensidad de la lluvia y su uniformidad fue obtenida mediante una malla regular de $2 \times 2 \text{ m}$ sobre la que se instalaron 80 pluviómetros a intervalos de 25 cm. Se midió el volumen de agua producido por el simulador durante un tiempo conocido para distintas presiones y tipos de boquillas hasta obtener aquella que diera mejores resultados en cuanto a uniformidad y tamaño de gota. El cálculo de la uniformidad se hizo mediante el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) (Christiansen, 1942) medido como:

$$CU(\%) = 100 \left(1 - \frac{x}{m n} \right) \quad [1]$$

donde: m , valor medio; n , número de observaciones y x , desviación estándar de las observaciones individuales respecto a la media.

El coeficiente de uniformidad obtenido fue de 88.76% y 91.29% para las boquillas 3/8GG20W y 1/3HH35W, respectivamente, lo cual es considerado como muy aceptable dentro de la literatura dedicada a los simuladores de lluvia.

3.2 Tamaño de las gotas

El tamaño de gota fue medido utilizando la técnica del papel de filtro (Hall, 1970) coloreado con un tinte soluble al agua (Green Janus $M = 511.07 \text{ g mol}^{-1}$). Dicho papel es expuesto a la lluvia durante 1 segundo de forma que el impacto de las gotas de lluvia sobre el papel coloreado produce manchas circulares, cuyos diámetros son función de los diámetros de las gotas originales. El tamaño de las manchas debe ser calibrado con gotas de un diámetro conocido. En el ensayo se ha utilizado la ecuación de calibración desarrollada por Brandt, (1989), utilizada por otros autores en experiencias similares (Cerdá, 1997). Según dicha ecuación:

$$m = 2.931 \cdot 10^{-5} \cdot D_m^{2.18} \quad [2]$$

$$D_g = 2 \frac{3}{M} 10^{-6} m^{-1/3} \quad [3]$$

siendo m , la masa de la gota (g); D_m , el diámetro de la mancha (mm) y D_g , el diámetro de la gota (mm).

Las medidas del diámetro de las manchas se realizó mediante análisis de la imagen con el programa Leica Qwin, una vez el papel fue secado y escaneado.

La forma más estandarizada de expresar el diámetro de la gota es el D_{50} o, lo que es lo mismo, el diámetro en el cual la mitad de la muestra (en volumen) está compuesta por gotas con diámetros mayores y la otra mitad por gotas de diámetros más pequeños. Los valores de D_{50} obtenidos aplicando 1 bar de presión fueron de 1.05 mm y 1.85 mm para las intensidades de lluvia de 33 y 60 mmh^{-1} respectivamente. Existen en la literatura resultados contrastados en cuanto a los diámetros de gota obtenidos con simulación de lluvia. Así, Cerdá *et al.*, (1997) obtuvieron diámetros de 2.53 mm para una lluvia de 54 mm h^{-1} aplicando una presión de 1.5bar; Panini *et al.*, (1993) obtuvieron una D_{50} de

1.80 mm para una intensidad de 35 mm h^{-1} ; Coutinho & Pereira Tomas (1995), obtuvieron para tormentas de 33 mm h^{-1} valores de D_{50} de 2.99 mm y para lluvias de intensidad de 53.6 mm h^{-1} un valor de D_{50} de 3.23 mm; todos ellos valores superiores a los obtenidos en nuestro estudio. Otros autores, por el contrario, han obtenido valores más bajos de diámetro de gota para intensidades similares. Asseline & Valentin (1978), obtuvieron una D_{50} de 1.49 mm para una lluvia de intensidad de 60 mm h^{-1} ; Navas *et al.*, (1990) obtuvieron un valor de 1.0 mm en una lluvia de 58 mm h^{-1} utilizando el mismo tipo de boquillas que en nuestro estudio.

La distribución del diámetro de las gotas con respecto al volumen total de lluvia están representados en la figura 2.

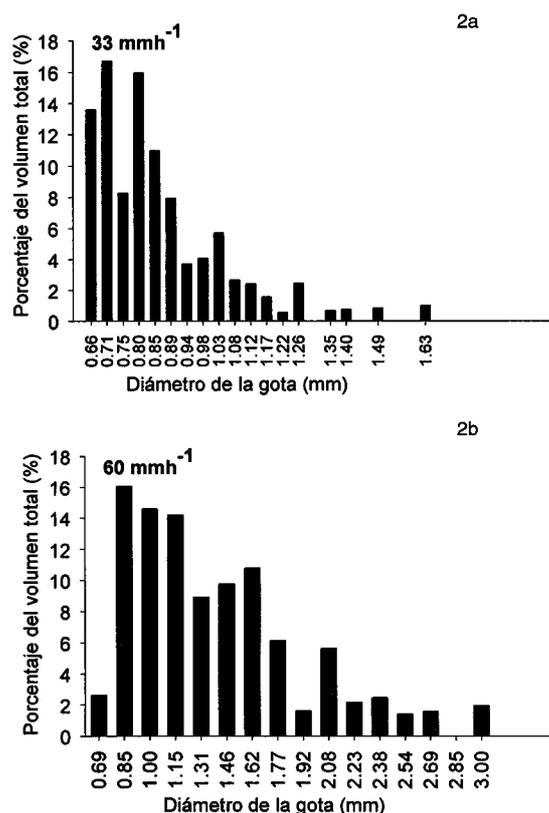


Figura 2. Distribución de los tamaños de gota (porcentaje del volumen total de lluvia). (a): intensidad de lluvia de 33 mmh^{-1} ; (b): intensidad de lluvia de 60 mmh^{-1} .

Figure 2. Drop-size distribution (% total rainfall volume). (a): 33 mmh^{-1} of rainfall intensity; (b): 60 mmh^{-1} of rainfall intensity.

3.3. Velocidad de la gota

La velocidad de la gota de lluvia fue calculada a partir de la ecuación propuesta por Gunn & Kinzer (1949), según la cual las gotas producidas por el simulador de lluvia tienen una velocidad terminal:

$$v = 2.9379 \cdot \ln(D_g) + 4.393 \quad [4]$$

siendo v , la velocidad ($m\ s^{-1}$) y D_g , el diámetro de la gota (mm).

La velocidad media de la gota obtenida para las lluvias simuladas de 30 y 60 $mm\ h^{-1}$ fue de 4.50 $m\ s^{-1}$ y 5.94 $m\ s^{-1}$ respectivamente (tabla 1), valores ligeramente más bajos que los obtenidos por otros autores para alturas y diámetros de gota similares a las del presente experimento (Laws, 1941; Navas *et al.*, 1990).

3.4. Energía cinética

La energía cinética de las gotas es un indicador del potencial erosivo de la lluvia. Para su determinación se calcula la energía cinética de la gota de lluvia mediante la expresión:

$$E_i = \frac{1}{2} (m_i v_i^2) 10^{-3} \quad [5]$$

siendo E_i , la energía cinética de la gota (J); m_i , la masa de la gota (g) calculada mediante las expresiones [2] y v , la velocidad de impacto ($m\ s^{-1}$) calculada mediante la expresión [4].

Para calcular la energía cinética de la lluvia simulada se pondera la energía cinética de cada gota representativa, por el número de gotas de cada diámetro que haya en el volumen de lluvia de intensidad I , mediante la expresión:

$$EC = \sum_{i=1}^n \frac{N_i I E_i}{D_i^3} 10^6 \quad [6]$$

en donde EC , es la energía cinética de la lluvia simulada ($J\ m^{-2}\ h^{-1}$); D_i , el diámetro de la gota (mm); N_i , el tanto por uno de gotas de diámetro D_i , I , la intensidad de lluvia simulada ($mm\ h^{-1}$) y E_i , la energía cinética de la gota.

Los valores de energía cinética obtenidos fueron de 275.07 $J\ m^{-2}\ h^{-1}$ y de 1070.29 $J\ m^{-2}\ h^{-1}$ para las lluvias de intensidad 33 y 60 $mm\ h^{-1}$ respectivamente. Las figuras 3 y 4 muestran el porcentaje del número de gotas que representa cada diámetro con respecto al número total, así como el porcentaje de la energía cinética con que contribuye cada uno de los diámetros a la energía cinética total de la lluvia para ambas intensidades. Se observa que los diámetros más pequeños son más numerosos pero contribuyen en menor medida a la energía cinética total. Para la lluvia de 60 $mm\ h^{-1}$ de intensidad, diámetros de gota por debajo de 1.46 mm constituyen el 86% del número total de gotas pero aportan solo el 35% de la energía. Sin embargo, tamaños de gota entre 1.61 y 3 mm que suponen solo un 12% del total de las gotas, contribuyen a la energía cinética de la lluvia en un 64.3% debido a su mayor masa.

Los valores de energía cinética obtenidos en esta experiencia fueron más bajos que los obtenidos por otros autores para zonas Mediterráneas en lluvias de similar intensidad a las de este estudio (López Bermúdez & Romero Díaz, 1992). Esto se atribuye al pequeño diámetro de gota producido por el tipo de boquillas utilizadas. Sin embargo, la alta uniformidad de lluvia conseguida en todas las simulaciones realizadas justificó la selección de las mismas para la realización de este tipo de experiencia.

4. Diseño del experimento

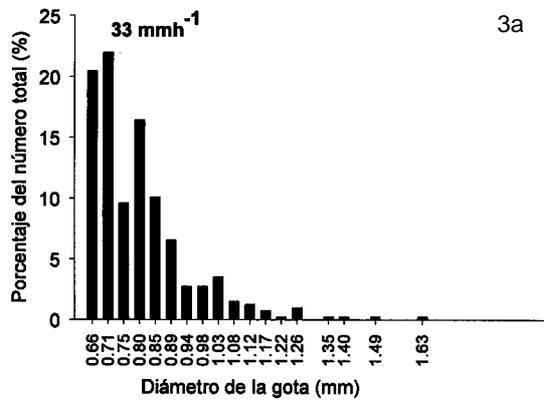
4.1 Tipo de parcelas

Las parcelas 2 x 2 m fueron subdivididas en 2 parcelas: parcela A y parcela B. La primera se utili-

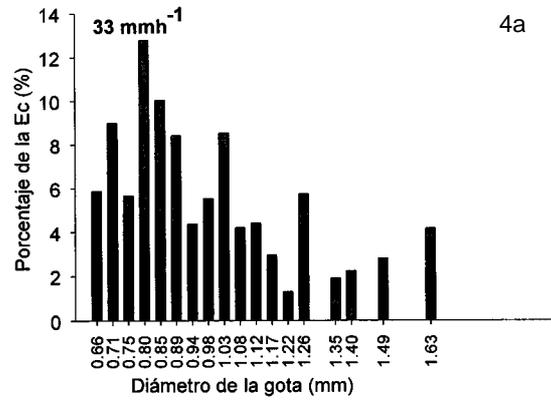
Tabla 1. Características principales de las tormentas simuladas
Table 1. Main characteristic of the simulated thunderstorm

Tipo de boquilla	Presión (bares)	Intensidad ($mm\ h^{-1}$)	Consumo ($l\ m^{-1}$)	CU (%)	v ($m\ s^{-1}$)	D50 (mm)	Ec ($J\ m^{-2}\ h^{-1}$)
3/8GG20W	1	33	10.21	88.76	4.51	1.05	275.07
1/3HH35W	0.9	60	17.46	91.29	5.94	1.85	1070.29

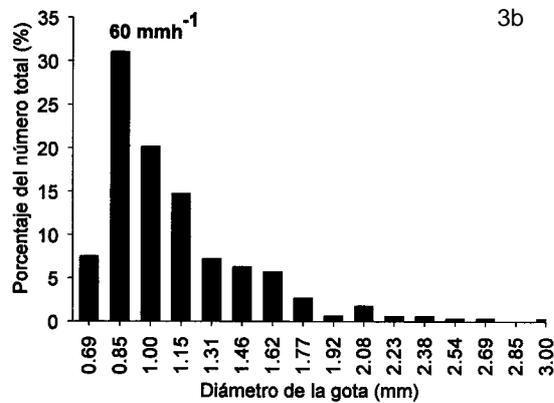
CU: coeficiente de uniformidad, v: velocidad, Ec: energía cinética



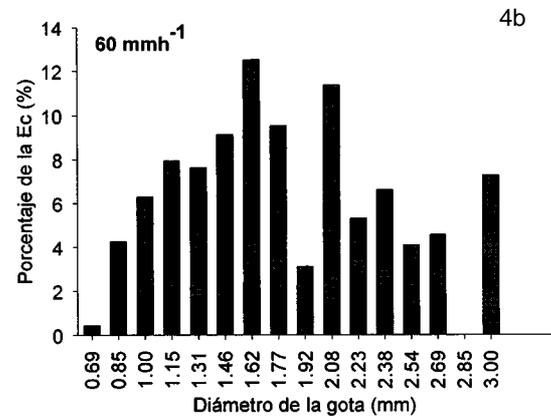
3a



4a



3b



4b

Figura 3. Distribución de los tamaños de gota (porcentaje del número total). (a): intensidad de lluvia de 33 mmh^{-1} ; (b): intensidad de lluvia de 60 mmh^{-1} .

Figure 3. Drop-size distribution (% total rainfall number) (a): 33 mmh^{-1} of rainfall intensity; (b): 60 mmh^{-1} of rainfall intensity.

Figura 4. Distribución de los tamaños de gota (porcentaje de la energía cinética total, Ec). (a): intensidad de lluvia de 33 mmh^{-1} ; (b): intensidad de lluvia de 60 mmh^{-1} .

Figure 4. Drop-size distribution (% total kinetic energy, Ec) (a): 33 mmh^{-1} of rainfall intensity; (b): 60 mmh^{-1} of rainfall intensity.

zó para la recogida de escorrentía y sedimento mientras que la parcela B fue a su vez dividida en 4 partes en el sentido de la pendiente ($0.25 \times 1 \text{ m}$) en donde se muestrearon los cambios en las propiedades de suelo y características superficiales (figura 5).

La subdivisión fue realizada con planchas de hierro galvanizado clavadas 1 cm en el suelo para evitar la entrada de agua de escorrentía de las partes adyacentes. Cada parte de la subparcela de la parcela B fue cubierta a intervalos de 5 minutos desde el inicio de la simulación. Para cubrir las subparcelas se usó una plancha de plástico encajada a unos rieles e inclinada hacia fuera de la misma para evitar que el agua de lluvia cayera en las subparcelas no cubiertas. El experimento parte de la hipótesis de que los cambios generados durante la

tormenta en la parcela A en determinados intervalos de tiempo: 5_t minutos ($t=1,2,3,4$), pueden esti-



marse midiendo las propiedades del suelo y superficie en las subparcelas cubiertas en esos mismos intervalos. Dado que la duración media de la lluvia en todas las simulaciones realizadas fue de 20 minutos, los intervalos de tiempo obtenidos representaron los cambios producidos a los 5, 10, 15 y 20 minutos de lluvia.

Se realizaron un total de 8 simulaciones en cada tipo de suelo (4 con baja intensidad y 4 con alta intensidad). Las características de los suelos de las dos zonas experimentales seleccionadas vienen reflejadas en la tabla 2. La intensidad baja media obtenida para todas las simulaciones fue de 29.66 ± 0.67 y 32.71 ± 1.23 mm h⁻¹ para los suelos sobre coluvios calizos y margas, respectivamente. La intensidad alta media fue de 54.93 ± 1.11 y

57.90 ± 2.43 mm h⁻¹ para los suelos sobre coluvios calizos y margas respectivamente.

El estado de humedad inicial del suelo osciló entre 13.16% y 34.27% en los suelos sobre coluvios calizos y entre 6.47% y 22.45% en los suelos de margas.

El seguimiento de los cambios en las propiedades físicas del suelo se hizo en 4 de las 8 simulaciones para cada tipo de suelo (2 con baja y 2 con alta intensidad).

4.2 Parámetros medidos

La tabla 3 muestra los parámetros medidos en cada subparcela.

Tabla 2. Propiedades del suelo de las dos zonas experimentales seleccionadas
 Table 2. Soil properties from the selected areas

PROPIEDADES	ZONA DE EXPERIMENTACIÓN	
	1	2
Litología	Coluvios calizos	Margas
Tipo de suelo	Calcisol pétrico	Regosol calcárico
Arcilla (%) (<2mm)	15.4	23.4
Limo (%) (2-50mm)	66.6	66.7
Arena (%) (50-2000mm)	18.0	9.0
Textura	Franco limosa	Franco limosa
Estabilidad de agregados (%)	69.12	43.91
Carbono orgánico (%)	0.94	0.30
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.22	1.37
Conductividad hidráulica saturada (cm h ⁻¹)	5.52 ± 8.82	3.54 ± 2.37
Pedregosidad superficial (%)	50-70%	< 30%

Tabla 3. Parámetros medidos en cada parcela
 Table 3. Measured parameters at each plot

Nivel	Parcela A Parámetro	Parcela B Parámetro
Superficie		Rugosidad Resistencia mecánica
Suelo		Curva característica de humedad del suelo Conductividad hidráulica saturada Densidad aparente
Sedimento	Sedimentograma Distribución del tamaño de partículas	
Hidrología	Hidrograma Tiempo encharcamiento	

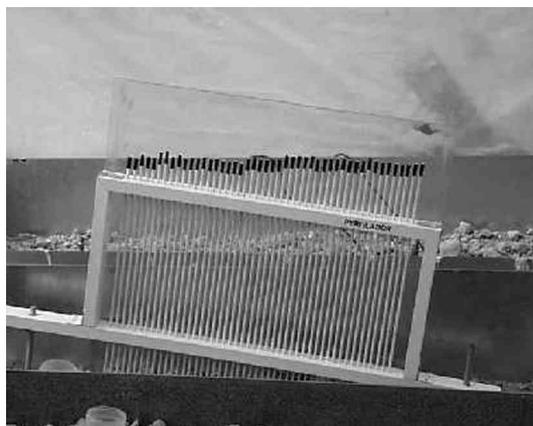
La rugosidad superficial del suelo fue medida utilizando un perfilómetro de contacto (Benito et al., 1988) que consiste en un bastidor de 50 x 42 cm, con un total de 47 agujas separadas a una distancia regular de 1 cm (figura 6). Se realizaron un total de 8 medidas en transectos paralelos a la pendiente para cada simulación: 4 anteriores a la simulación de lluvia y 4 posteriores. Los perfiles se localizaron en las 4 subparcelas de la parcela B, de forma que representaban los cambios en la rugosidad superficial del suelo a los intervalos t de tiempo definidos. Los perfiles fueron registrados mediante fotografía digital y posteriormente tratados con el programa de análisis de imagen Leica Qwin.

La resistencia mecánica del suelo fue medida con un penetrómetro de bolsillo (torvane, Eijkelkamp. 0-2.5 kg cm²). Se realizaron cinco medidas en cada una de las subparcelas de la parcela B después de la lluvia aplicada.

La curva característica de humedad del suelo se obtuvo en el laboratorio utilizando una combinación del método del recipiente de tensión hídrica (sand-box) para valores de pF por debajo de 2.7 y membrana de presión para valores de pF entre 3.5 y 4.2 (Martínez Fernández, 1992).

La densidad aparente se determinó a partir de muestras de suelo (con un volumen de 98.175 cm³) inalteradas secadas en una estufa a 105°C. Las muestras fueron recogidas de los primeros 5 cm de suelo.

La conductividad hidráulica saturada se midió en el laboratorio usando un permeámetro de carga



constante. Se utilizaron las mismas muestras inalteradas que para la densidad aparente y la curva característica de humedad en el suelo, de forma que se analizaron en una misma muestra todas las propiedades del suelo.

5. Resultados y Discusión

Se presentan a continuación los cambios obtenidos en algunas de las propiedades superficiales y del suelo a lo largo de la tormenta.

5.1 Cambios en la superficie del suelo durante la tormenta

5.1.1 Rugosidad superficial

El índice de rugosidad utilizado en este experimento fue la rugosidad aleatoria relativa (Zobeck & Onstand, 1987) que se define como:

$$RRR = RRd/RRa$$

siendo RRd , la rugosidad aleatoria después de la lluvia aplicada y RRa : la rugosidad aleatoria antes de la lluvia.

La rugosidad aleatoria se calculó como la desviación estándar de las alturas de las agujas del perfilómetro después de eliminar la rugosidad orientada debida a la pendiente (Allmaras et al., 1966).

La figura 7 muestra el cambio de rugosidad relativa con la energía cinética para los dos tipos de suelo. Mientras que en los suelos de margas la rugosidad superficial disminuyó conforme aumenta la energía cinética de la lluvia, en los suelos sobre coluvios calizos no se observó ninguna relación entre ambas variables. La figura 8 muestra el cambio en rugosidad superficial en una de las simulaciones realizadas sobre suelos de margas a los 5, 10, 15 y 20 minutos del inicio de la lluvia. Los mayores cambios se observaron entre los 10 y 15 minutos de la tormenta, mientras que en los primeros 5 minutos, donde la cantidad de lluvia fue bastante baja (2.5 mm), la diferencia en la rugosidad inicial y final fue prácticamente inapreciable.

Contrariamente a la tendencia generalizada de un descenso en la rugosidad superficial con la lluvia, en algunas simulaciones existió un aumento de la rugosidad ($RR > 1$) en los instantes iniciales de la

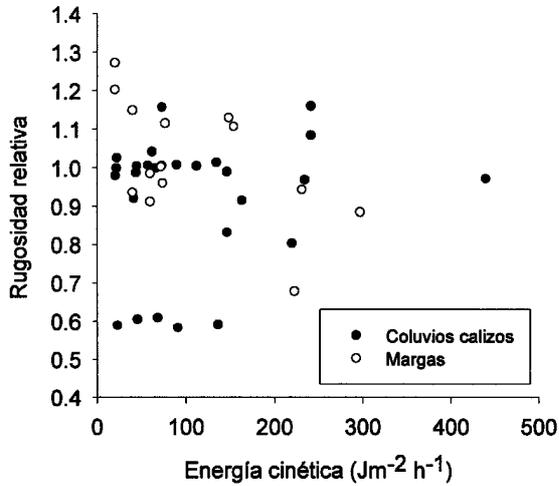


Figura 7. Variación de la rugosidad aleatoria relativa (RRR) de la superficie del suelo en función de la energía cinética acumulada.

Figure 7. Variation in relative surface roughness random (RRR) in relation to cumulative kinetic energy.

simulación. Este aumento es debido a la acción protectora de las piedras ante el impacto de las gotas de lluvia y la formación de pequeños pedestales de erosión, aumentando así la rugosidad microtopográfica entre las zonas protegidas y las zonas de suelo expuestas directamente al golpeteo de la lluvia. Conforme transcurre la tormenta, la sedimentación de las partículas suspendidas contribuye a una suavización microtopográfica con la consiguiente reducción de la rugosidad.

La disminución de rugosidad en el suelo con el incremento en lluvia y energía cinética (y así la disminución del volumen de agua almacenada y por ende el incremento en escorrentía) ha sido destacado por numerosos autores (Zobeck & Onstand, 1987; Bertuzzi *et al.*, 1990; Borselli, 1999;). Esta reducción tiene como consecuencia la disminución de la infil-

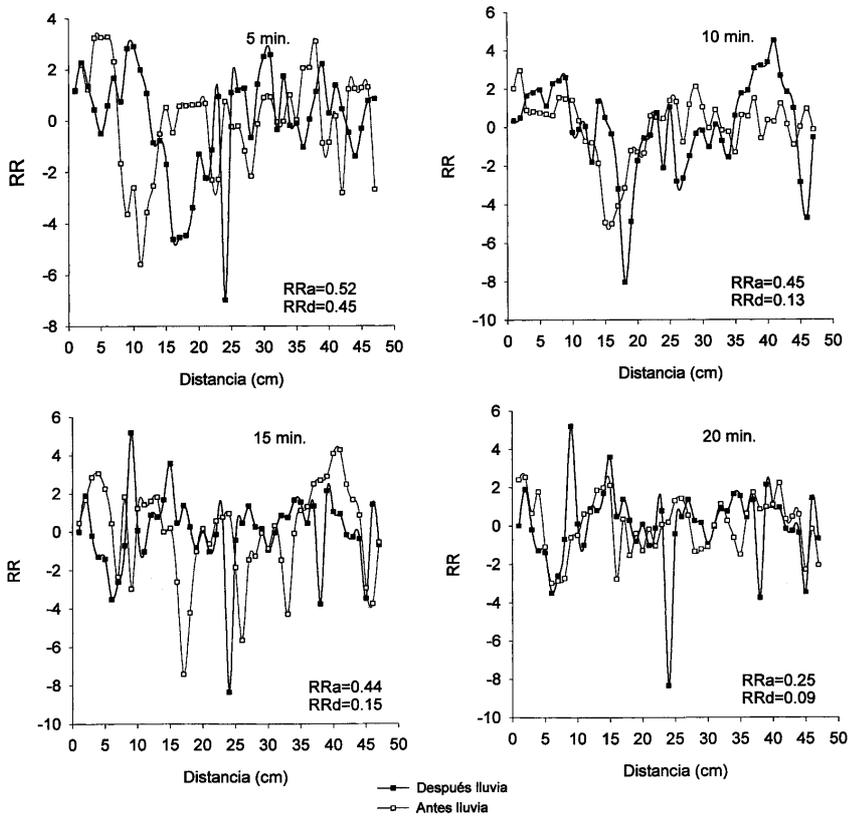


Figura 8. Cambios en la rugosidad aleatoria (RR) de la superficie del suelo a los 5 (a), 10 (b), 15 (c) y 20 (d) minutos desde el inicio de la tormenta para una de las simulaciones realizadas en suelo de margas.

Figure 8. Variation in surface random roughness at 5 (a), 10 (b), 15 (c) and 20 (d) minutes since starting rainfall. Simulation on marl soil.

tracción y el incremento de la escorrentía superficial poniendo de relieve la importancia de las condiciones superficiales del suelo en el proceso de erosión.

5.1.2 Resistencia mecánica del suelo

Se observaron ligeros cambios en la resistencia mecánica del suelo durante la tormenta tanto en los suelos desarrollados sobre margas como en los suelos sobre coluvios calizos. La figura 9 muestra la evolución durante la tormenta de la resistencia mecánica para dos simulaciones de baja intensidad, una sobre suelos de margas y otra sobre coluvios calizos. La resistencia mecánica experimentó un aumento en los primeros minutos de la tormenta y después se estabilizó. Los valores siempre fueron mayores en los suelos de margas que en los suelos sobre coluvios calizos. Asimismo, el incremento de la resistencia mecánica fue más rápido (10 minutos) en los suelos de margas que en los suelos sobre coluvios calizos (15 minutos). Incrementos rápidos de la resistencia mecánica del suelo son un indicativo de su gran susceptibilidad al sellado superficial (Bradford & Foster, 1996).

5.2 Cambios en propiedades físicas del suelo durante la tormenta

5.2.1 Densidad aparente

En los suelos sobre margas hubo, en general, un ligero aumento de los valores de densidad

aparente desde el inicio de la tormenta. Este aumento se aceleró transcurridos los primeros 10 minutos de la tormenta en los que hubo un aumento del 8.57%, desde 1.28 g cm^{-3} a 1.40 g cm^{-3} hasta el final de la tormenta. Algunos autores, sin embargo, han encontrado un aumento en los valores de densidad aparente con la lluvia hasta que alcanzan un valor de equilibrio (después de 30 minutos de lluvia) donde la densidad aparente no cambia (Slattery & Bryan, 1992; Fohrer *et al.*, 1999).

En los suelos del coluvios calizos, se observó una mayor variabilidad en la evolución de este parámetro durante la tormenta. Así, en algunas simulaciones siguió la misma pauta que los suelos de margas (figura 10), mientras que en otras hubo un ligero descenso hacia el final de la tormenta. La gran variabilidad observada en la evolución de la densidad aparente con la cantidad de lluvia impidió establecer una correlación significativa entre la precipitación y, por tanto, la energía cinética de la lluvia y la densidad aparente en estos suelos. Por el contrario, en los suelos desarrollados sobre margas, existe una correlación positiva, estadísticamente significativa ($r=0.60$, $p=0.018$) entre la energía cinética de la lluvia y la densidad aparente que refleja el aumento del valor de este parámetro durante la tormenta (figura 11).

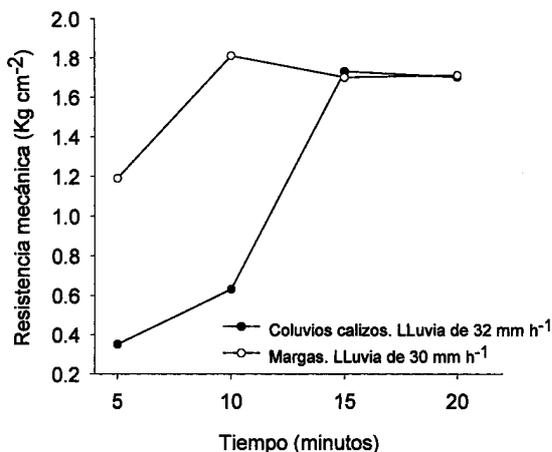


Figura 9. Cambio de la resistencia mecánica del suelo durante la tormenta.

Figure 9. Variation in soil shear strength within storm.

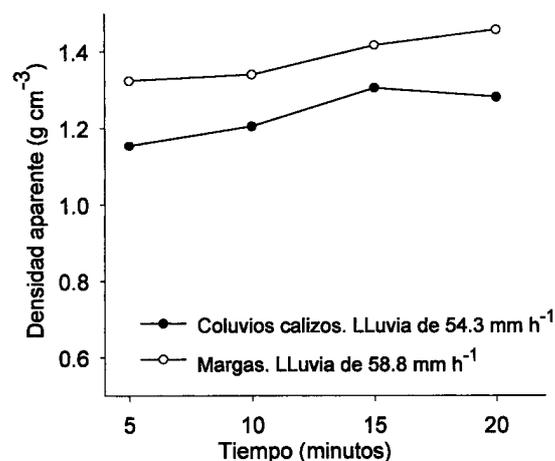


Figura 10. Cambio de la densidad aparente durante la tormenta.

Figure 10. Variation in bulk density within storm.

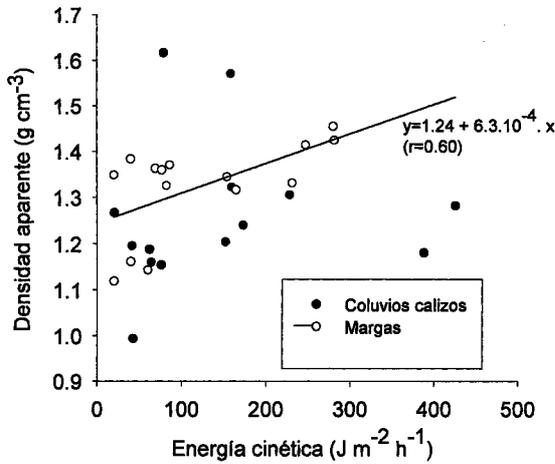


Figura 11. Variación de la densidad aparente en función de la energía cinética acumulada.
 Figure 11. Variation in bulk density in relation to cumulative kinetic energy.

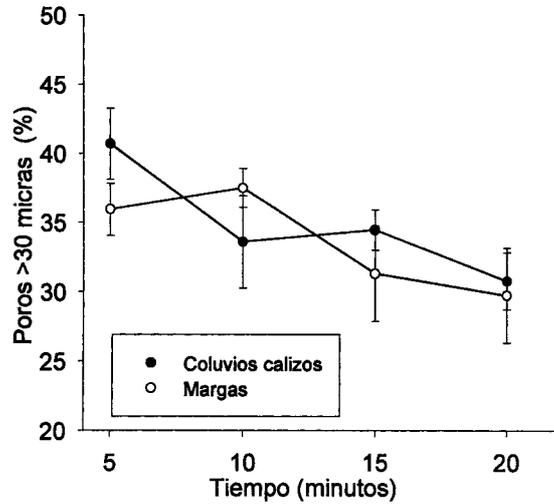


Figura 12. Cambio en el porcentaje de macroporos (poros>30mm) durante la tormenta. Valor medio de todas las simulaciones.
 Figure 12. Variation in macroporosity percentage (pores>30mm) within storm. Mean values of the simulations.

5.2.2 Porosidad

A partir de las curvas características de humedad se estudió los cambios producidos en el porcentaje de macroporos (poros>30mm), responsables de la transmisión del agua en el suelo

El porcentaje de macroporos disminuyó aproximadamente en un 10% desde el inicio al final de la lluvia en ambos suelos. En los suelos de margas el mayor descenso se observó a partir de los 10 minutos de lluvia, mientras que en los suelos de coluvios calizos dicho descenso se produjo en los primeros 5 minutos de lluvia manteniéndose constante el resto de la simulación (figura 12). Se obtuvieron relaciones estadísticamente significativas entre la energía cinética de la lluvia y la disminución de porosidad para los suelos de coluvios calizos ($r=-0.61$, $p=0.015$) y de margas ($r=-0.78$, $p=0.00$) (figura 13). La disminución de la macroporosidad con la energía cinética es un reflejo del efecto del impacto de la gota de lluvia sobre la estructura del suelo (Panini, *et al.*, 1997). El porcentaje de macroporos del suelo regula la velocidad de infiltración de agua en el suelo (Bouma, 1992). Su disminución provoca una reducción de su capacidad de infiltración y, como consecuencia, un aumento del volumen de escorrentía generada.

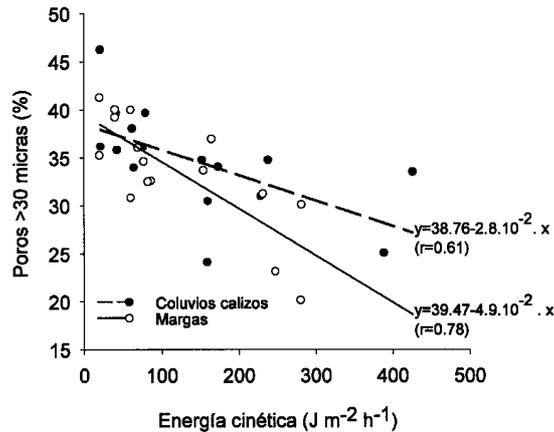


Figura 13. Cambio en el porcentaje de macroporos (poros >30mm) en función de la energía cinética acumulada.
 Figure 13. Variation in macroporosity percentage (pores >30mm) in relation to cumulative kinetic energy.

5.2.3 Conductividad hidráulica saturada

Los valores medios obtenidos de conductividad hidráulica saturada para todas las simulaciones fueron de $3.71 \pm 5.63 \text{ cm h}^{-1}$ y $4.53 \pm 2.97 \text{ cm h}^{-1}$ para los suelos del coluvios calizos y de margas, respectivamente. No se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre este parámetro y la

energía cinética de la lluvia, debido probablemente a la alta variabilidad espacial que presenta este parámetro. No obstante, se observó una cierta tendencia lineal negativa en ambos suelos con una disminución de los valores de conductividad hidráulica saturada conforme aumentó la energía cinética de la lluvia (figura 14). Este resultado fue consistente con la correlación negativa y estadísticamente significativa observada entre el porcentaje de macroporos y la energía cinética comentada en el apartado anterior.

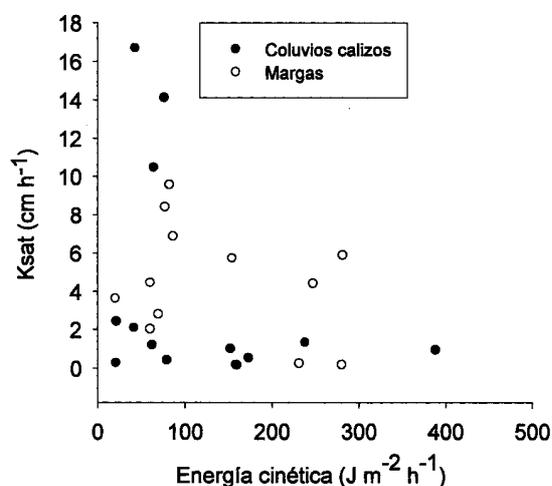


Figura 14. Cambio en la conductividad hidráulica saturada en función de la energía cinética acumulada.
Figure 14. Variation in saturated hydraulic conductivity in relation to cumulative kinetic energy.

6. Conclusiones

Tanto el simulador de lluvia como el diseño experimental aplicado en el presente estudio ha sido muy apropiado para los objetivos del estudio. Hay que destacar en cuanto al aparato: 1) la simplicidad y rapidez en el montaje, 2) el tipo de boquillas utilizadas que permitió que una sola de éstas cubriera, con una alta uniformidad de lluvia, una superficie de 2 x 2 m y 3) el bajo consumo de agua (aproximadamente 200 y 350 litros en 20 minutos para lluvias de baja y alta intensidad, respectivamente), lo cual es un aspecto a tener en cuenta cuando se realizan simulaciones de lluvia en zonas semiáridas donde las posibilidades de acceder a tomas de agua son muy escasas.

El experimento diseñado fue válido para el estudio de los cambios en las propiedades de la superficie y el suelo durante la tormenta. No obstante, la alta variabilidad espacial de las propiedades del suelo estudiadas en este experimento impidió que los cambios estudiados tuvieran una mayor significación estadística. Se necesitaría un mayor número de muestras y un mayor tiempo de simulación para obtener mejores resultados, pero los realizados hasta el momento apuntan algunas conclusiones interesantes.

A partir de los diez minutos desde el inicio de la tormenta se producen los mayores cambios en las propiedades superficiales y físicas del suelo estudiadas. A partir de los 15 minutos estos cambios remiten. La rapidez de dichos cambios es un indicativo de la vulnerabilidad de estos suelos a la generación de escorrentía y erosión.

En los suelos desarrollados sobre margas se obtuvieron mejores relaciones entre la energía cinética de la lluvia y los cambios en las propiedades físicas y superficiales del suelo que en los suelos desarrollados sobre coluvios calizos. En los primeros se observó un incremento de la densidad aparente y disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el aumento de la precipitación y de la energía cinética. Dichos cambios fueron consistentes con la disminución en el porcentaje de los poros de transmisión (poros >30mm) responsables del drenaje de agua en el suelo. El cambio de estas propiedades durante la tormenta es un indicador de la formación de un sellado superficial en el suelo, que parece no afecta a los suelos desarrollados sobre coluvios calizos del Cuaternario.

Los cambios observados en las propiedades superficiales y físicas del suelo constatan el carácter dinámico del proceso erosivo y la importancia de la inclusión de dichos cambios en los modelos de erosión del suelo.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto «Modelling Within Storm Erosion Dynamic» (ENV4-CT97-0687) financiado por la Comunidad Económica Europea. Los autores también expresan su agradecimiento al personal de mantenimiento (en especial a Antonio Gil) por la asistencia técnica en campo y laboratorio, así como las personas del departamento de Conservación de Suelos y Agua del CEBAS que participaron en las simulaciones realizadas durante la experiencia.

Referencias bibliográficas

- Allmaras, R.R., Burwell, R.E., Larson, W.E., & Holt, R.F. (1966). *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage*. USDA Conserv. Res. Rep. 7, 22pp.
- Asseline, J. & Valentin, C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltrómetro á aspersion. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, XV (4): 321-349.
- Benito, G., Gutierrez, M. & Sancho, C. (1988). Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. En: *Métodos y técnicas para la medición en campo de procesos geomorfológicos*. Sala, M. & Gallart, F. eds.). Monográfico SEG 1. Zaragoza. 54-57.
- Bertuzzi, P., Rauws, G. & Courault, D. (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 17, 87-99.
- Borselli, L. (1999). Segmentation of soil roughness profiles. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 71-90.
- Bouma, J. (1992). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Adv. Agronomy* 46, 1-37.
- Bradford, J.M. & Foster, G.R. (1996). Interrill soil erosion and slope steepness factors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 909-915.
- Brandt, C.J. (1989). The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena*, 16, 507-524.
- Cerdá, A. (1997). Rainfall drop size distribution in the Western Mediterranean basin, Valencia, Spain. *Catena*, 30, 169-182.
- Cerdá, A., Ibañez, S. & Calvo, A. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11, 163-170.
- Christiansen, J.E. (1942). Irrigation by sprinkling. *Univ. Calif. Expt. Sta. Bull.*, 670.
- Coutinho, M.A. & Pereira Tomás, P. (1995). Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Centre. *Catena*, 25, 187-197.
- Fohrer, N., Berkenhagen, J., Martin Hecker, J. & Rudolph, A. (1999). Changing soil and surface conditions during rainfall. Single rainstorm/subsequent rainstorms. *Catena*, 37, 355-375.
- Gunn, R. & Kinzer, G.R. (1949). Terminal velocity of water droplets in stagnant air. *J. Meteorol.*, 6, 243-248.
- Hall, M.J. (1970). Use of stain method in determining the drop-size distributions of coarse liquid sprays. *Trans. ASAE*, 41, 33-37.
- Laws, J.O. (1941). Measurement of the fall velocity of water drops and rain drops. *Trans. Am. Geophys. Union*, 22, 709-721.
- López Bermúdez, F. & Romero Díaz, M.A. (1992-93). Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. Tomos XVIII/XIX. 28 pp.
- Martínez-Fernández, J. (1992). *Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo. Cuenca de la rambla de Perea*. Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 233pp.
- Navas, A., Alberto, F., Machín, J. & Galán, A. (1990). Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology*, 3, 385-397.
- Panini, T., Salvador Sanchis, M.P., & Torri, D. (1993). A portable rain simulator for rough and smooth morphologies. *Quaderni Di Scienza del Suolo*, Voll V, 47-58.
- Panini, T., Torri, D., Pellegrini, S., Pagliali, M. & Salvador Sanchis, M.P. (1997). A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. *Catena*, 31, 199-218.
- Slattery, M.C., & Bryan, R.B. (1992). Laboratory experiments on surface seal development and its effect on interrill erosion processes. *J. Soil Sci.*, 43, 517-529.
- Zobeck, T.M. & Onstand, C.A. (1987). Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. *Soil and Tillage Research*, 9, 1-20.

Recibido el 27 de octubre de 2001

Aceptado el 7 de marzo de 2001