

RELACIÓN ENTRE LA ESCALA ESPACIAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN UNA PEQUEÑA CUENCA HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA ANTE CONDICIONES CONTRASTADAS DE HUMEDAD DEL SUELO (EXTREMADURA, SUROESTE DE ESPAÑA)

A. CEBALLOS (1,2), S. SCHNABEL (1), D. GÓMEZ-AMELIA (1)
& A. CERDÀ (3)

(1) Área de Geografía Física. Dpto. de Geografía y O.T. Universidad de Extremadura. Avda de la Universidad s/n. 10071-Cáceres (España).

(2) Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro. 3810-Aveiro (Portugal).

(3) Departament de Geografia. Universitat de València. Apartado de correos 22060. 46080-Valencia (España).

Resumen: El presente trabajo estudia la dinámica de los procesos hidrológicos (escorrentía superficial) en distintas escalas dentro del ecosistema dehesa: escala de pedón con un simulador de lluvia, escala de vertientes mediante mediciones del flujo superficial en parcelas abiertas y, finalmente, a escalas de cuenca de orden 1 y 2. Se ha analizado el funcionamiento hidrológico de los distintos niveles del sistema bajo condiciones antecedentes de los suelos muy contrastadas (ambiente seco y ambiente húmedo). Los resultados demuestran que en los niveles 1 y 2 (microparcels y vertientes) es más fácil determinar los factores que explican su comportamiento hidrológico, mientras que en los niveles 3 y 4 (cuencas de orden 1 y 2) ello es más complicado debido a su heterogeneidad espacial, con discontinuidad de flujo a causa de los mecanismos de infiltración, en los fondos de valle rellenos de sedimentos, del agua escurrida por las vertientes. La influencia de la humedad del suelo sobre los procesos también ha sido definida.

Palabras clave: hidrogeomorfología, escorrentía superficial, escala, humedad del suelo, dehesa.

Abstract: The present paper studies the hydrological processes (surface runoff) at different spatial scales in the dehesa ecosystem: pedon scale with a rainfall simulator, slope scale with surface runoff measurements in open plots and, finally, catchment scale of order 1 and 2. The hydrological behaviour at the different levels is analyzed under two contrasting conditions: dry and humid environment. The results show that at the microplot and at the hillslope scale the dominating factors of runoff production are easier to explain than at the catchment scale, where heterogeneity increases, with discontinuous fluxes due to infiltration in the sediment-filled valley bottoms. The influence of soil moisture on the processes has been defined as well.

Key words: hydrogeomorphology, surface runoff, scale, soil moisture, dehesa.

1. Introducción

El paisaje geomorfológico es el resultado de los procesos que operan en diferentes escalas espacio-temporales (Bergkamp, 1996). Si bien los estudios sobre escalas han insistido en aspectos espaciales y/o temporales de los procesos geomorfológicos, el presente trabajo se centra en la variabilidad de la escorrentía superficial atendiendo a la escala espacial y ante diferentes condiciones antecedentes de humedad del suelo.

El auge de la modelización en la hidrología durante las últimas décadas ha llevado a los investigadores a preguntarse si los modelos varían con la escala de análisis (Beven, 1995). Es un error general pretender aplicar modelos de comportamiento diseñados en superficies reducidas y homogéneas (por ejemplo una parcela experimental) a superficies de mayor tamaño (por ejemplo una cuenca hidrográfica), en las que los modelos no responden a relaciones lineales y los sistemas son heterogéneos (Beven, 1996). A pesar de que muchos modelos hidrológicos están basados en pequeñas superficies homogéneas, los sistemas hidrológicos reales no son homogéneos como lo indica la heterogeneidad de los parámetros medidos en el campo (Sunada, 1993).

Así pues, para conocer el funcionamiento de cualquier sistema es preciso conocer cómo se comporta en un rango de escalas amplio (Gómez Plaza *et al.*, in press), ya que cada escala espacial representa un nivel jerárquico de organización del ecosistema. Se trataría de aplicar la Teoría de los Sistemas Jerárquicos (O'Neill *et al.*, 1986), que entiende que los ecosistemas son sistemas complejos, abiertos y dinámicos, jerárquicamente organizados, con mecanismos de funcionamiento diferentes pero interconectados (Bergkamp, 1995). Igual que ocurre con los procesos atmosféricos, diferentes procesos hidrológicos ocurren en distintas escalas (Blöschl, & Sivapalan, 1995): por ejemplo, la generación de flujo superficial por mecanismo hortoniano puede estudiarse en una superficie reducida, mientras que para el análisis de flujo superficial por saturación se necesita una superficie de mayor tamaño que agregue varios procesos producidos en escalas menores. El estudio del flujo en canal requerirá un análisis a escala de cuenca.

Puede concluirse que cada proceso tiene su escala adecuada de estudio y que por tanto debe ser medido en esa escala con los métodos y técnicas adecuados (Shmakin *et al.*, 1993). La respuesta hidrológica de un sistema se manifiesta en una jerarquía de escalas que va desde la escala puntual a la regional, pasando por las escalas de parcelas, vertientes, pequeñas cuencas y grandes cuencas (Sivapalan, 1993).

La cuenca de Guadalperalón funciona como área experimental desde 1990 (Gómez Amelia & Schnabel, 1992), ubicada dentro del ecosistema dehesa, paisaje agrario representativo y de gran importancia económica y elevado valor ambiental en la mayor parte del oeste-suroeste español (Campos Palacín, 1993). Se han desarrollado una serie de investigaciones destinadas a conocer los procesos físicos que operan en las dehesas: erosión de suelos, degradación de la cubierta vegetal, infiltración de agua, producción de escorrentía en vertientes, balance de agua y balance de sedimentos a nivel de cuenca (Bernet, 1995; Schnabel, 1997; Ceballos, 1997; Cerdà *et al.*, in press).

Este estudio profundiza y completa la línea de otros anteriores (Ceballos *et al.*, 1996) centrándose en el análisis de los problemas que se plantean en el estudio de los procesos hidrológicos (escorrentía) considerados en distintas escalas (hidrología de suelos, de vertientes y global de cuenca), así como las posibles conexiones existentes entre las mismas. Se han utilizado datos correspondientes a condiciones antecedentes de la cuenca muy contrastadas (suelos muy secos y muy húmedos) con el objetivo de precisar el grado con el que los procesos estudiados cambian por este motivo. Puede afirmarse que las mediciones realizadas de las tasas de escorrentía a distintas escalas permiten conocer y entender los procesos geomorfológicos al aportar información sobre la forma cómo se produce la escorrentía y los caminos que sigue hasta ser evacuada fuera de la cuenca de drenaje.

En las últimas dos décadas numerosos grupos de investigación, dependientes de la Universidad y del CSIC, están estudiando los procesos hidrológicos, especialmente en áreas mediterráneas semiáridas y campos abandonados (Ministerio de Medio Ambiente, 1996). El presente trabajo pretende ser una aportación más a una línea actualmente abierta en los estudios hidrogeomorfológicos, con la producción y análisis de una serie de datos (empleando las técnicas adecuadas a cada escala) correspondientes a los diferentes niveles de un sistema determinado y en un medio muy poco estudiado hasta el momento como es la dehesa.

2. Zona de estudio

El área estudiada se localiza 22 km al noreste de la ciudad de Cáceres, pertenece a la cuenca del río Magasca, dentro de la red hidrográfica del río Tajo y se halla integrada en la mitad oriental de la unidad geomorfológica de la Penillanura Cacerreña (Gómez Amelia, 1985) (fig. 1).

Los suelos desarrollados sobre las pizarras del Complejo Esquisto Grauváquico (C.E.G) pertenecen al grupo de los Leptosoles y Regosoles, dependiendo de sus características topográficas y/o fisiográficas, y se caracterizan por: una profundidad muy variable que oscila entre los 0 y 120 cm, una porosidad y densidad medias de 51,5 % y 1,26 gr cm⁻³ respectivamente, una textura principalmente franca, estructura granular y bajos valores de materia orgánica.

El clima es mediterráneo, con influencias tanto oceánicas como continentales, con una temperatura media anual de 16 °C, siendo los inviernos moderados y los veranos calurosos. La precipitación media anual es de 512 mm en 85 días de lluvia. La variabilidad anual e interanual de las precipitaciones es alta, predominando el número de años con valores inferiores a los medios y siendo frecuentes las situaciones de sequía.

La vegetación potencial pertenece a la serie climatofila mesomediterránea luso-extremadurensis de la encina (*Quercus rotundifolia*), con densidades de arbolado comprendidas entre los 0 y 40 pies/hectárea. En las zonas sin arbolado predominan los arbustos (*Lavandula stoechas*). Los fondos de valle rellenos de sedimento se hallan cubiertos por plantas herbáceas (leguminosas y compuestas fundamentalmente). El aprovechamiento principal de la dehesa de Guadalperalón es el ganadero, con una cabaña casi exclusiva de oveja merina que varía entre 0 y 2,3 cabezas/hectárea.

Según muestra la figura 2 en la cuenca se distinguen las siguientes unidades principales (Gómez Amelia & Schnabel, 1992):

- a) Superficie de erosión culminante. Comprende la zona de interfluvios planos con pendientes inferiores al 9 %. La profundidad del suelo varía entre 10 y 40 cm según la topografía. Debido a la escasa superficie de esta unidad apenas es representativa de la cuenca, por lo cual no aparece en el mapa (fig. 2).
- b) Vertientes en las vaguadas. Las pendientes de esta unidad son muy variables, oscilando entre el 10 y el 37 %. Los máximos valores se registran en el extremo sur de la cuenca, conforme el encajamiento del arroyo es más pronunciado y se aproxima a su confluencia con el río Magasca. La profundidad de los suelos de esta unidad oscila, por término medio, entre los 0 y 15 cm, siendo variable el nivel de degradación de los mismos con porosidades entre 47,5 % en los puntos más degradados y 51,9 % en los menos.

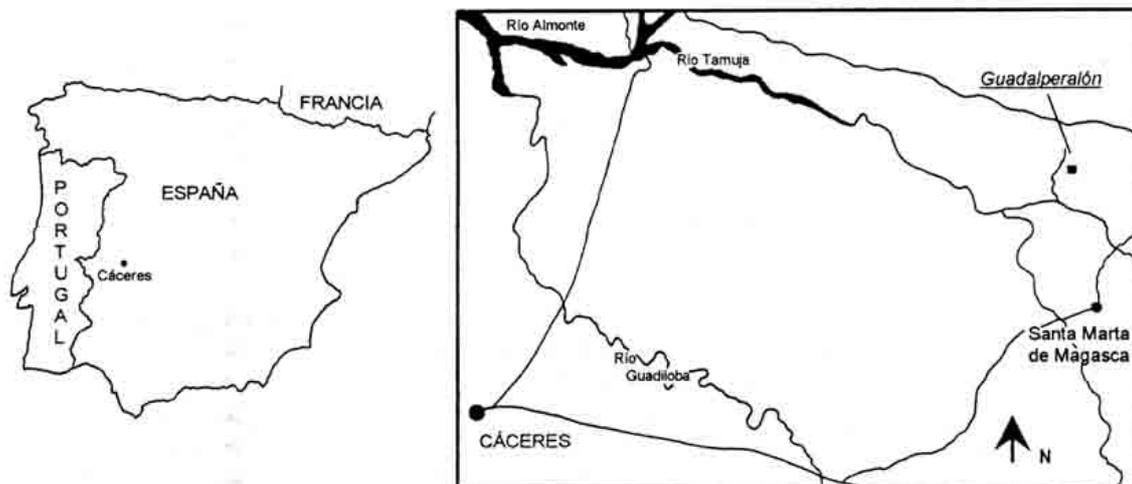


Fig.1. Localización de la zona de estudio.
Location of study area.

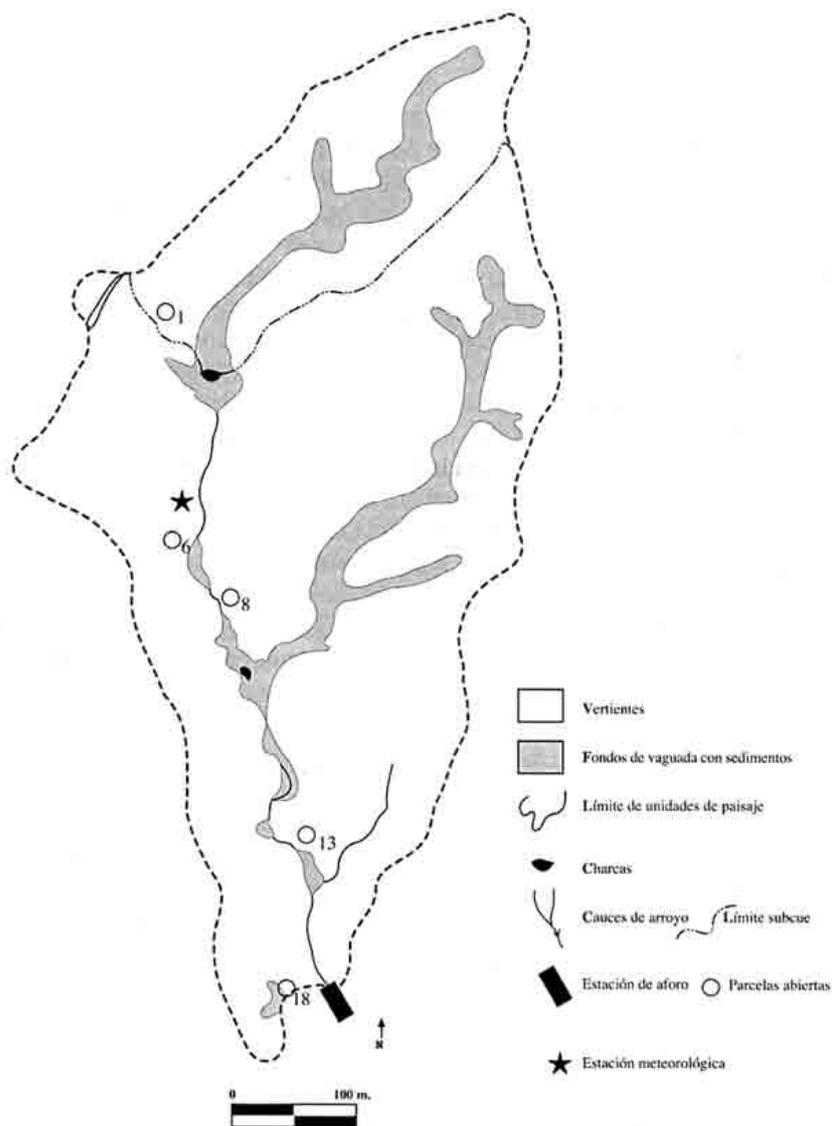


Fig. 2. Mapa de la cuenca de Guadalperalón: localización de los instrumentos instalados y principales unidades geomorfológicas.
 Map of the Guadalperalón catchment with location of the instruments and the principal geomorphological units.

c) Fondos de vaguada. Se trata de fondos de valle rellenos con materiales fluvio-coluviales procedentes de las vertientes. Es la zona con menos pendiente, con valores muy bajos, próximos al 0 %. La profundidad de los suelos es superior a los 100 cm y la porosidad media es de un 58 %, lo cual supone un importante contraste con los datos de las vertientes.

La cuenca hidrográfica de Guadalperalón tiene una superficie de 35,4 hectáreas y presenta forma alargada con orientación meridiana. La existencia de una charca con volúmenes entre 133 y 302 m³, dependiendo de las labores de reexcavación, destinada a abrevadero de ganado, permite distinguir una subcuenca en la zona norte con una superficie de 7,7 hectáreas.

3. Métodos y técnicas

Para la realización del presente estudio se realizaron mediciones a escala de pedón (0,25 m²) con experimentos de lluvia simulada, vertientes mediante parcelas abiertas con cajas Gerlach (7,4-47,3 m²) y una parcela cerrada de 16 m², una cuenca de drenaje —que denominamos subcuenca— de orden 1 (76.982 m²), y finalmente una cuenca de orden 2 —cuenca global— (277.237 m²) mediante un aforador. Cada una de las escalas utilizadas engloba a las restantes, representando distintas jerarquías dentro del sistema general considerado o cuenca de orden 2.

La escorrentía generada a escala de pedón ha sido medida mediante lluvia simulada a una intensidad elevada y en condiciones de máxima sequedad estival (mayo de 1995, humedad media de 2,7 % en los 3 cm superficiales del suelo) y máxima humedad invernal (febrero de 1996, humedad media de 37,5 % en los 3 cm superficiales del suelo). Se realizaron dos series de 20 experimentos con chaparrones de una intensidad de 53,6 mm h⁻¹ (intensidad que logra la distribución más homogénea de las gotas de lluvia con el simulador utilizado), mantenidos durante una hora sobre 1 m² de terreno, aunque las mediciones se realizan sólo en la parte central (0,25 m²) para reducir el efecto borde (Meyer, 1988). La arroyada superficial se ha medido cada minuto. En todos los experimentos se pretendía alcanzar la tasa de infiltración estable con el fin de conocer este parámetro, así como la curva de escorrentía en su totalidad (Cerdà, 1995). El simulador de lluvia utilizado es del tipo pulverizador (Cerdà *et al.*, 1997).

La escorrentía en vertientes es cuantificada por medio de 17 parcelas abiertas (trampas tipo Gerlach de 0,5 m de ancho), con colectores de escorrentía con capacidad entre 25 y 100 litros, distribuidas en 5 unidades caracterizadas por su relación suelo-vegetación (Schnabel, 1997). Hay instalada una parcela cerrada de 2 x 8 m con un divisor de escorrentía de 10 ranuras y un colector de 25 litros de capacidad. Las muestras son recogidas inmediatamente después de cada suceso de precipitación y el total de la escorrentía es cuantificado con una probeta de 1 litro de capacidad.

Para medir la escorrentía superficial generada en la tercera escala de medición -cuenca de drenaje de orden 1 o subcuenca- se calculó el volumen de la charca mediante la ejecución de 7 perfiles topográficos transversales y 1 longitudinal. En el punto más profundo de la concavidad se instaló una estaca con divisiones centimétricas, lo cual permitió estimar las fluctuaciones en el volumen debido a la relación existente entre altura del agua y volumen de la misma como expresa la siguiente ecuación (Ceballos, 1997):

$$\log V = \log a + b \cdot \log h$$

donde V = volumen de la charca, h = altura del agua, y a y b son constantes.

Las mediciones de nivel se realizaron a las pocas horas de finalizar el evento para evitar los posibles errores derivados de la infiltración, evaporación y consumo de agua por parte del ganado.

En la salida de la cuenca —cuarta escala de medición— se halla instalado un aforador tipo H-flume de tres pies de altura para medir la descarga acuosa de la cuenca (U.S. Department of Agriculture, 1979). Mediante un sensor de profundidad de agua (marca Unidata), conectado a un registrador automático (Macrologger 7000 de Unidata) se determina el caudal medio, máximo y mínimo cada 5 minutos. Ello permite elaborar el hidrograma correspondiente a cada evento y calcular el coeficiente de escorrentía del mismo.

La precipitación se midió con un pluviómetro tipo balancín modelo ARG100 (fabricado por Omnidata International LTD), con 0,2 mm de resolución, conectado a un registrador automático (fabricado por Unidata) que toma datos en intervalos de 5 minutos. 6 pluviómetros totalizadores están distribuidos en el área para estudiar la variabilidad espacial de las precipitaciones.

En el presente trabajo se ha utilizado una selección de parcelas y eventos para su comparación con el resto de escalas consideradas. Los datos corresponden a los años hidrológicos 1994-95 y 1995-96. El primer año, con 331,5 mm de precipitación total, puede calificarse como de “muy seco”, mientras el segundo, con 720,1 mm, fue “muy húmedo” (INM, 1994). Esta circunstancia incide directamente en la frecuencia de eventos con escorrentía superficial y en el volumen de la misma.

Las parcelas abiertas elegidas representan las principales unidades espaciales de la cuenca. Las parcelas 1, 6 y 13 se localizan en vertientes arboladas con número de pies variable, suelos con profundidad infe-

rior a 40 cm, densidad media de $1,35 \text{ gr cm}^{-3}$ y una pendiente media de $14,4^\circ$. La parcela 8 se localiza en una zona de vertientes rocosas, desprovista de arbolado y con estrato arbustivo de *Lavandula stoechas*. Los suelos son escasamente profundos ($<10 \text{ cm}$), debido a la abundancia de afloramientos superficiales de roca madre, con una densidad de $1,36 \text{ gr cm}^{-3}$. La pendiente media es de $12,6^\circ$. La parcela 18 se sitúa en un área de sedimentación fluvio-coluvial, con suelos profundos (en algunos puntos se superan los 100 cm), una densidad de $1,34 \text{ gr cm}^{-3}$ y una pendiente media de $10,9^\circ$.

Se han seleccionado aquellos eventos con precipitaciones totales y/o intensidades máximas altas que garanticen generación de escorrentía tanto en las vertientes como en la subcuenca y cuenca, con el fin de poder establecer comparaciones, ya que en varios casos se produce escorrentía superficial en las vertientes sin ninguna salida de la cuenca debido a los mecanismos de infiltración (Schnabel, 1995; Ceballos & Schnabel, 1997). Para ello la variable utilizada ha sido el coeficiente de escorrentía. Hay que indicar que el cálculo del coeficiente de escorrentía en las vertientes es problemático en el caso de las parcelas abiertas. El área correspondiente a cada una se ha obtenido multiplicando el ancho de la misma ($0,5 \text{ m}$) por la longitud de la vertiente desde la caja hasta la línea divisoria, aunque el resultado obtenido no corresponda con el área real de la parcela, que puede ser mayor o menor.

Los eventos seleccionados agrupados bajo la denominación de ambiente seco se produjeron en unas condiciones de humedad antecedente del suelo inferior al 5% en superficie. Sin embargo los pertenecientes al ambiente húmedo se caracterizan por desarrollarse con unos suelos que habían alcanzado su capacidad de campo tanto en las vertientes (25%) como en los fondos de valle ($>30 \%$). La humedad del suelo ha sido determinada por medio del método gravimétrico (Reynolds, 1970).

4. Resultados y discusión

4.1. Respuesta hidrológica a escala de pedón

A escala de pedón, nivel 1, la tabla 1 muestra los coeficientes de escorrentía de las microparcels seleccionadas durante los 30 primeros minutos del experimento (COEF 0-30 min), suelo seco, y los segundos 30 minutos del mismo (COEF 30-60 min), suelo saturado. Las intensidades de lluvia aplicadas en los experimentos, considerando 30 minutos de duración, tienen un período de recurrencia de 40 años en la zona de estudio (Observatorio de Cáceres). En los 39 años con series de intensidades horarias disponibles en el Observatorio de Cáceres, nunca se registró una intensidad en 60 minutos tan elevada, estimándose un período de retorno de 2.000 años para 53 mm h^{-1} . La duración e intensidad de los experimentos permiten estudiar el comportamiento del sistema bajo condiciones extremas e inusuales. En el análisis comparativo de escalas se ha optado por los coeficientes de escorrentía en los primeros 30 minutos del experimento por ofrecer un mayor ajuste a las situaciones más normales en la zona considerada. Los coeficientes obtenidos son muy altos, indicando una escasa capacidad de infiltración de los suelos.

Las condiciones antecedentes de la cuenca son fundamentales en la respuesta hidrológica de la misma (tabla 1). Los coeficientes de escorrentía obtenidos en ambiente húmedo, tanto en la primera como en la segunda mitad del experimento, duplican a los de ambiente seco. Comparando los coeficientes obtenidos durante la segunda mitad del experimento en seco (media = $42,7 \%$) con los obtenidos durante la primera mitad en húmedo (media = $78,5 \%$) puede afirmarse que los suelos en condiciones secas, salvo sus centímetros superficiales, no se saturan y tienen una mayor capacidad de infiltración. Debido a que los experimentos se realizaron en los mismos puntos, con unas condiciones de exposición, pendiente, pedregosidad, porosidad, densidad y profundidad del suelo similares en ambas series, puede considerarse la humedad antecedente como el principal factor que explica la variabilidad estacional de la escorrentía a escala de pedón (Cerdà, 1996), determinando además el modelo de flujo (hortoniano en seco y superficial por saturación en húmedo).

MICROPARCELA	COEF 0-30 min (%)		COEF 30-60 min (%)	
	seco	húmedo	seco	húmedo
01	56,0	85,8	69,4	90,1
06	27,2	73,6	45,5	79,8
08	20,6	85,9	26,6	91,1
13	18,0	73,1	31,1	78,8
18	33,6	74,0	40,9	78,5
media	31,1	78,5	42,7	83,7

Tabla 1. Coeficientes de escorrentía en los primeros 30 minutos de los experimentos con lluvia simulada (COEF 0-30 min) y en los segundos 30 minutos (COEF 30-60 min). Valores absolutos y medios.

Runoff coefficients for the time interval 0 to 30 minutes (COEF 0-30 min) and the time interval 30 to 60 minutes (COEF 30-60 min) during the experiments with simulated rainfall. Absolute and mean values.

4.2. Vertientes

A escala de vertiente, nivel 2, se ha observado escorrentía superficial a partir de 5,7 mm de precipitación total, con intensidades máximas en 10 y 30 minutos superiores a 10 mm h⁻¹ y 5 mm h⁻¹ respectivamente. Mientras que la variación espacial de la escorrentía en las vertientes está relacionada con la cubierta vegetal y propiedades del suelo, los cambios temporales se explican por la cantidad e intensidad de lluvia en relación con la humedad del suelo. Considerando la precipitación total y la intensidad máxima en 10 minutos como variables independientes en un modelo de regresión múltiple para explicar la escorrentía obtenemos un r² de 0,81 (N=48; error estándar=6,3 litros; valor-p=0,000). Aunque entre humedad edáfica y escorrentía no se haya encontrado una relación estadística, analizando sólo los eventos con suelos muy húmedos el ajuste de la regresión es mayor (r²=0,91; N=13; error estándar=3,2 litros; valor-p=0,000) (Ceballos, 1997).

En el estudio de la escala de vertiente, se ha encontrado una importante limitación de la técnica empleada. Durante lluvias cuantiosas e intensas se han desbordado los contenedores de escorrentía, resultando insuficientes bidones con 100 litros de capacidad. Esta circunstancia introduce un margen de error en los análisis realizados, ya que los valores reales son superiores a los estimados. Si en el año hidrológico 1994-95 (año seco) la probabilidad de desbordamiento del conjunto de parcelas abiertas instaladas en las vertientes fue de 1,1 veces/año; en 1995-96 (año húmedo) fue de 6,1 veces/año, apreciándose, además, una importante variabilidad espacial, debido a lo cual la comparación de este nivel de análisis con los demás se hace difícil en ambiente húmedo. Este dato ilustra acerca de la importancia de las condiciones previas sobre los procesos de generación de escorrentía.

4.3. Relación entre microparcels y cajas Gerlach

Comparando las tablas 1 y 2 se aprecia que la producción de escorrentía en ambiente seco ha sido mayor en los experimentos que la registrada en las parcelas abiertas, como consecuencia de una diferencia de comportamiento debido a la escala y al hecho de que la intensidad de la lluvia en los experimentos sea sensiblemente superior como puede comprobarse en la tabla 3. En ambiente húmedo no puede determinarse si las diferencias entre ambas escalas han sido grandes o pequeñas debido al desbordamiento de los bidones. En la correlación entre los coeficientes de escorrentía medios de las 17 parcelas abiertas de la cuenca obtenidos durante dos años de estudio y la intensidad máxima en 60 minutos (figura 3) se contempla la probabilidad de altos coeficientes de escorrentía en las vertientes ante intensidades similares a la empleada en los experimentos, con valores que sobrepasan el 25 % como promedio y que en varios casos serían bastante superiores.

Nº evento	Coeficientes de escorrentía (%)											Área (m ²)	
	ambiente seco						ambiente húmedo						
	2	4	5	12	15	17	26	28	29	36	41	42	
Vertientes													
01	>27,7	6,4	16,1	16,4	5,2	>28,2	>33,8	>21,8	>30,8	>34,1	25,7	>26,7	12,5
06	>31,5	16,9	14,0	18,7	6,1	>32,0	>38,4	>24,8	>35,0	>38,7	38,5	>30,3	11,0
08	>7,3	6,6	4,0	7,0	4,1	>7,4	>8,9	>5,6		>9,0	6,1	>7,0	12,5
13	16,2	15,4	7,9	10,7	14,7	>22,2	8,9	>17,2	10,9	20,3	25,9	>21,1	10,0
18	>13,3	1,6	6,1	1,4	10,6	>13,5	>16,2	>10,5	>14,8	0,6	0,0	1,0	26,0
Subcuenca	2,9	1,2	3,4	1,4	0,0	6,8							76982
Cuenca	0,8	1,3	6,4	2,1	0,5	1,6	13,4	24,9	33,9	4,9	1,4	8,0	277237

Tabla 2. Coeficientes de escorrentía para eventos de precipitación en diferentes escalas (parcelas abiertas en vertientes, subcuenca y cuenca) y condiciones antecedentes (suelos secos y suelos húmedos).

Runoff coefficients for rainfall events at different spatial scales (open plots on slopes, subcatchment and catchment) and antecedent conditions (dry and humid soils).

Nº Evento	Ambiente seco						Ambiente húmedo					
	2	4	5	12	15	17	26	28	29	36	41	42
P.TOT (mm)	27,4	16,2	28,5	19,0	9,2	27,0	22,5	34,8	24,7	22,3	11,2	28,5
I-10 (mm h ⁻¹)	30,6	15,3	(*)	39,7	25,2	32,4	37,2	40,8	33,6	33,6	25,2	44,4
I-30 (mm h ⁻¹)	22,6	9,8	(*)	17,1	10,4	14,8	16,4	20,4	13,6	16,4	13,6	28,8
I-60 (mm h ⁻¹)	16,8	7,2	(*)	8,5	5,4	8,2	9,0	15,8	9,4	8,6	9,6	16,8

Tabla 3. Descripción de los eventos seleccionados: P.TOT (precipitación total), I-10, I-30 e I-60 (intensidades máximas en 10, 30 y 60 minutos respectivamente).

Description of the selected events: P.TOT (rainfall amount), I-10, I-30 and I-60 (10-minute, 30-minute and 60-minute maximum rainfall intensities).

4.4. Cuencas de drenaje

A escala de subcuenca o cuenca de orden 1, nivel 3, los coeficientes de escorrentía de la serie de eventos analizada ofrecen un grado de correlación bajo con la precipitación total ($r^2=0,39$; $N=15$; error estándar=1,51 %; valor- $p=0,014$). La introducción de las intensidades de lluvia en el modelo de regresión no mejoran los resultados.

Lo mismo puede afirmarse en el análisis correspondiente a la cuenca de orden 2 o cuenca mayor, nivel 4, ($r^2=0,42$; $N=17$; error estándar=2,84 %; valor- $p=0,037$), lo cual dificulta enormemente precisar un umbral de precipitación a partir del cual se origine flujo en la salida de la cuenca. Considerando la serie de datos disponible correspondiente a los dos años analizados, si en condiciones de cuenca seca una lluvia de 27,4 mm de precipitación total e intensidad máxima en 10 minutos de 30,6 mm h⁻¹ produjo un coeficiente de escorrentía del 0,75 %; en condiciones de cuenca húmeda, con suelos próximos a su capacidad de campo, una precipitación total de 20,4 mm e intensidad máxima en 10 minutos de 22,8 mm h⁻¹ provocó un coeficiente del 7,65 % (Ceballos, 1997). La complejidad de los sistemas, conforme jerárquicamente son más importantes, explica esta falta de correlación. Si las vertientes, a pesar de que en ellas muchos elementos y factores varíen en distancias muy cortas, pueden asimilarse como un sistema más uniforme que la cuenca hidrográfica, en el cual es posible establecer relaciones lineales que expliquen el comportamiento de la escorrentía superficial, las cuencas de orden 1 y 2 se muestran como sistemas heterogéneos (vertientes más fondos de valle rellenos de sedimentos), con un comportamiento complejo que difícilmente puede

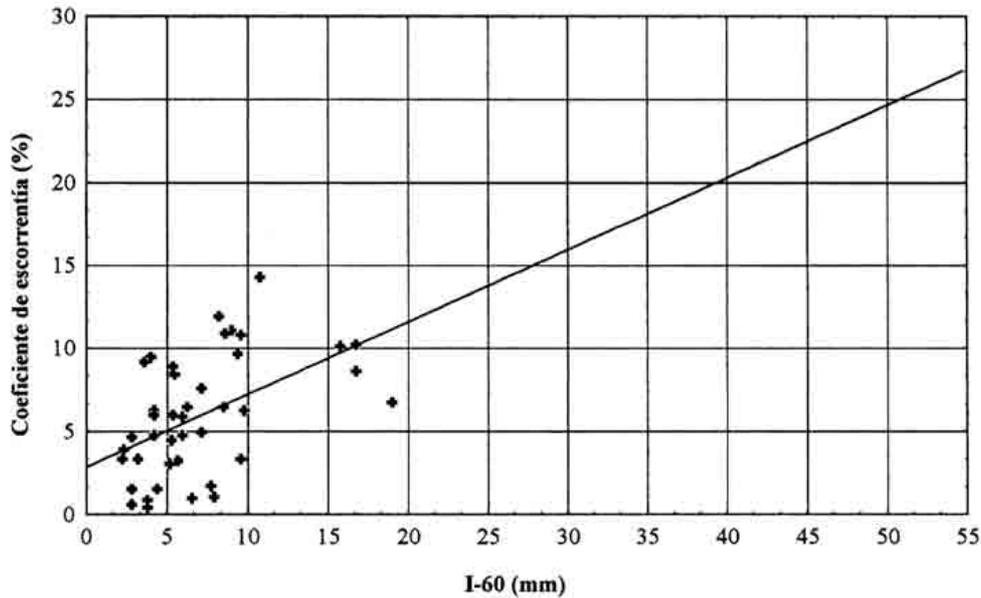


Fig. 3. Regresión lineal entre coeficientes de escorrentía (media de las 17 parcelas abiertas) e intensidades máximas en 60 minutos ($r^2=0,25$; $N=42$; error estándar=3,1% y valor- $p=0,007$). La ampliación del eje X ilustra sobre la posibilidad de obtener altos coeficientes de escorrentía en vertientes ante intensidades similares a las utilizadas en los experimentos de simulación de lluvia.
Linear correlation between runoff coefficients (mean values of 17 open plots) and 60 minute maximum intensity ($r^2=0,25$; $N=42$; standar error=3,1% y p -value=0,007). The extension of the X-axis illustrates the possibility of obtaining high coefficients with intensities in the order of those used during the rainfall simulations.

expresarse en un modelo de regresión. En muchas ocasiones la capacidad de infiltración de los fondos de valle es suficiente para retener la totalidad de la escorrentía que fluye por las vertientes, evitando que se produzcan salidas de la cuenca. Estos mecanismos de reinfiltración son frecuentes en pequeñas cuencas en zonas semiáridas (Yair & Lavee, 1985).

En la cuenca de Guadalperalón las lluvias del otoño del año 1995-96 provocaron el desbordamiento de la charca, por lo que no se dispone de datos de la cuenca de orden 1 en el ambiente húmedo. No obstante, con los datos correspondientes a la situación seca puede deducirse un comportamiento análogo al de la cuenca de orden 2 pese a que el tamaño de ésta sea 5 veces superior al de aquella.

La figura 4a muestra como en ambiente seco las 4 escalas consideradas se agrupan en dos conjuntos claramente diferenciados. Un primer grupo, con coeficientes nunca superiores al 10 %, constituido por la subcuenca y cuenca, y un segundo grupo, formado por las microparcelas y vertientes, con valores generalmente muy por encima del 10 %.

En ambiente húmedo (fig. 4b) los coeficientes de escorrentía a escala de pedón son notablemente más altos que en ambiente seco, con valores que no bajan del 70 %. Debido a las limitaciones metodológicas expuestas con anterioridad, en condiciones de ambiente húmedo es difícil la comparación de los datos obtenidos en las vertientes con el resto de las escalas analizadas. En algunas parcelas (tabla 2) se han obtenido coeficientes mínimos próximos al 40 %, circunstancia que indica que las diferencias entre la escala de vertiente y pedón son en realidad menores que las reflejadas en el gráfico. En ambiente húmedo llaman la atención los bajos coeficientes de escorrentía (menor o igual al 1 %) registrados en la parcela 18 durante algunos eventos (36, 41 y 42). El crecimiento excepcional de una mata vegetal en el primer m^2 de la parcela alteró la dirección habitual del flujo hacia la misma, desviando la escorrentía hacia los lados. A escala de cuenca de orden 2 la figura 4b muestra que los coeficientes de escorrentía pueden alcanzar valores por encima del 30 %, en algunos eventos, debido a la baja capacidad de infiltración de los fondos de valle, cuando están saturados, y a la aparición de flujo subsuperficial a través de macroporos y flujo de retorno que provocan que el tramo de recesión del hidrograma sea mucho más largo.

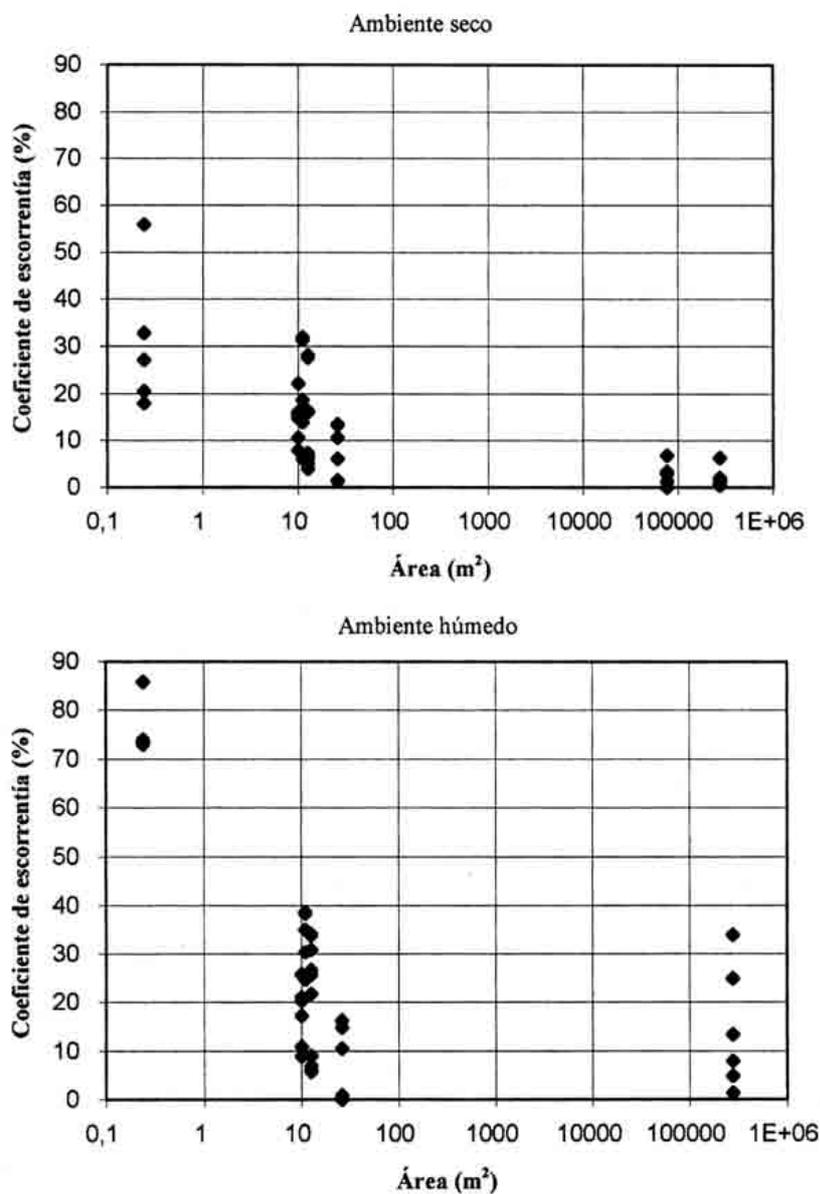


Fig. 4. Relación entre área de cuenca y coeficiente de escorrentía en ambiente seco (4.a) y ambiente húmedo (4.b).
 Relationship between drainage area and runoff coefficients in dry environment (4.a) and humid environment (4.b).

La tabla 4 refleja los coeficientes de escorrentía anuales de las vertientes, cuenca de orden 1 y cuenca de orden 2. En el año 1994-95 el coeficiente de escorrentía en las vertientes, al igual que en el análisis por eventos, superó a los de la cuenca y subcuenca ya que la mayor parte de la escorrentía producida en las vertientes quedó retenida en los fondos de valle rellenos de sedimentos, con una alta capacidad de infiltración durante períodos secos. En el año húmedo (1995-96) el coeficiente de escorrentía en la cuenca de orden 2 es casi cinco veces mayor que en 1994-95 debido a la continuidad del flujo en canal durante largos períodos de tiempo alimentado por el flujo subsuperficial y de retorno producidos en la zona de acumulación próxima al cauce principal. En el invierno del año 1995-96 hubo flujo ininterrumpido en la salida de la cuenca durante 52 días, con un coeficiente de escorrentía del 27,9 % para dicho período. Con el

dato disponible a escala de vertientes (>6,7 %) no puede realizarse comparación alguna con la cuenca de orden 2.

<i>Escala</i>	<i>año 1994-95</i>	<i>año 1995-96</i>
vertientes (nivel 2)	4,4	>6,7
subcuenca (nivel 3)	1,0	
cuenca (nivel 4)	2,9	14,2

Tabla 4. Coeficientes de escorrentía (%) anuales de los niveles 2, 3 y 4 del sistema estudiado.
Annual runoff coefficients (%) of the system levels 2, 3 and 4.

El estudio de los umbrales de precipitación necesarios para que se produzca escorrentía en los diferentes niveles del sistema aclara la importancia de la escala en los procesos hidrológicos: conforme aumenta el tamaño de la superficie de análisis mayor es el umbral. A escala de pedón el umbral es de 1,9 mm en ambiente húmedo y 5,2 mm en ambiente seco; a escala de vertientes el umbral está en 5,7 mm; 7,4 mm es el umbral de la subcuenca o cuenca de orden 1 y 9,0 mm de la cuenca global o cuenca de orden 2.

Si exceptuamos los datos de las microparcels en ambiente húmedo, puede afirmarse que los valores de los coeficientes de escorrentía son más variables cuanto menor es la superficie de medición.

5. Consideraciones finales

Los factores que explican los procesos de escorrentía, y los procesos geomorfológicos que de ella dependen, varían según la escala de análisis. Para conocer el comportamiento global del sistema será, por tanto, fundamental estudiar el funcionamiento de sus distintos niveles o escalas, así como las interconexiones entre los mismos.

En los niveles 1 y 2 estudiados (microparcels y vertientes) han podido determinarse los factores que controlan su comportamiento hidrológico debido a su mayor homogeneidad espacial. Sin embargo, en los niveles 3 y 4 (cuencas de orden 1 y 2) resulta mucho menos sencillo debido a su heterogeneidad espacial, lo que se traduce en discontinuidades de flujo y modelos de generación de escorrentía más complejos. Esto además implica la desconexión entre los niveles 1 y 2, por un lado, y los niveles 3 y 4 por otro.

El estudio de las diferentes escalas que componen el sistema es fundamental para detectar el impacto de las acciones del hombre sobre el medio. El encostramiento del suelo por parte del ganado en fases de sobrepastoreo, y su influencia sobre un aumento de la densidad de los centímetros superficiales y la consiguiente reducción de la capacidad de infiltración, es fácilmente detectable a escala de pedón. Las prácticas de mejora de pastos, con un aumento del porte y densidad del estrato herbáceo y porosidad del suelo, puede ser estudiado a escala de vertientes. La construcción o reexcavación de charcas para abrevadero de ganado, prácticas de deforestación en general (podas masivas, arranque de arbolado, etc), podrán ser analizadas a escala de cuenca.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, en el marco del proyecto AMB95/0986-CO2-02, y apoyado por la Junta de Extremadura, Dirección General de Enseñanzas Universitarias e Investigación. El primer autor manifiesta su agradecimiento por la disponibilidad de una beca postdoctoral financiada por la Junta de Extremadura (Consejería de Educación y Juventud) y el Fondo Social Europeo.

Referencias bibliográficas

- Bergkamp, G.** (1995): A hierarchical approach for desertification assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 37, 59-78.
- Bergkamp, G.** (1996): *Mediterranean ecosystems. Hierarchical organisation and degradation*. CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag.
- Bernet, R.** (1995): *La cubierta herbácea en sistemas de dehesa degradados. Conexiones entre vegetación y erosión*. Fundicot-Extremadura, Universidad de Extremadura y Junta de Extremadura.
- Beven, K.** (1995): Linking parameters across scales: subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models. *Proc. Workshop on scale problems in hydrology*, Robertson, Australia. Hydrological Processes, 9, 263-281.
- Beven, K.** (1996): The limits of splitting: Hydrology. *The Science of the Total Environment*, 183, 89-97.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M.** (1995): Scale issues in hydrological modelling: A review. En KALMA, J.D. & SIVAPALAN, M. (Eds): *Scale Issues in Hydrological Modelling*, Willey, Chichester, 9-48.
- Campos Palacín, P.** (1993): Valores comerciales y ambientales de las dehesas españolas. *Agricultura y Sociedad* n°66, 9-41. MAPA, Madrid.
- Ceballos, A.** (1997): *Balance de agua en una cuenca hidrográfica bajo explotación de dehesa en Extremadura*. Tesis Doctoral Inédita. Dpto. de Geografía y O.T. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Extremadura, 207 p.
- Ceballos, A. & Schnabel, S.** (1997): Runoff generation in a small catchment under silvopastoral landuse in SW Spain. En VIVILLE, D. & LITTLEWOOD, I. G. (Eds): *Conference on Ecohydrological Processes in Small Basins*. IHP-V Technical Documents in Hydrology N° 14, 99-104. UNESCO, París.
- Ceballos, A., Schnabel, S. & Cerdà, A.** (1996): El efecto de la escala sobre los procesos de escorrentía superficial. En GRANDAL, A. & PAGÉS, J. (Eds): IV Reunión de Geomorfología. S.E.G. *Cadernos*, 21, 91-102.
- Cerdà, A.** (1995): *Factores y variaciones espacio-temporales en la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Geoforma Ediciones, 151p, Logroño.
- Cerdà, A.** (1996): Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma* 69, 217-232.
- Cerdà, A., Ibáñez, S. & Calvo, A.** (1997): Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* 11, 163-170.
- Cerdà, A., Schnabel, S., Ceballos, A. & Gómez Amelia, D.** (en prensa). Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa Ecosystem, Extremadura, SW Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Gómez Amelia, D.** (1985): *La penillanura cacereña. Estudio geomorfológico*. Dpto. de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Servicio de Publicaciones. Universidad de Extremadura.
- Gómez Amelia, D. & Schnabel, S.** (1992): Procesos sedimentológicos e hidrológicos en una pequeña cuenca bajo explotación de dehesa en Extremadura. En LÓPEZ BERMÚDEZ, F., CONESA GARCÍA, C. & ROMERO DÍAZ, Mª A. (Eds): *II Reunión Nacional de Geomorfología*, 55-63. S.E.G., Murcia.
- Gómez Plaza, A., Castillo, V.M. & Albadalejo, J.** (in press): Estudio de procesos hidrológicos a diferentes escalas (marco teórico y propuesta metodológica). *Norba Geografía*. Dpto de Geografía y O.T. Universidad de Extremadura.
- I.N.M.** (1994): *Calendario Meteorológico 1993*. Madrid.
- Meyer, L.D.** (1988): Rainfall simulators for soil conservation research. En LAL, R. (ed): *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society of Soil Science, 74-95.
- Ministerio de Medio Ambiente** (1996): *Proyecto Lucdeme*. ROJO SERRANO, L. & SÁNCHEZ FUSTER, M.C. (Coord.). Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- O'Neill, R.V, De Angelis, D.L., Waide, J.B., & Allen, T.F.H.** (1990): *A hierarchical concept of ecosystems*. Princenton University Press, New Jersey. 253 pp.
- Reynolds, S.G.** (1970): The gravimetric method of soil moisture determination. Part I. A study of equipment and methodological problems. *Journal of Hydrology*, 11: 258-273.

- Schnabel, S.** (1995): *Hydrologische und erosive Prozesse in einem kleinen Einzugsgebiet unter silvo-pastoraler Landnutzung in Extremadura, Spanien*. Tesis Doctoral. Freie Universität Berlin.
- Schnabel, S.** (1997): *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain*. Geofoma Ediciones, 167 pp, Logroño.
- Shmakin, A.B., Mikhailov, A.Yu. & Bulanov, S.A.** (1993): Parameterization scheme of the land hydrology considering the orography at different spatial scales. *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*. IASH Publ. n° 112, 569-575.
- Sivapalan, M.** (1993): Linking hydrologic parameterizations across a range of scales: hillslope to catchment to region. *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*. IASH Publ. n° 112, 289-297.
- Sunada, K.** (1993): A study of scale effects on the estimation of maximum direct runoff rates using a catchment model. *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*. IASH Publ. n° 112, 289-297.
- U.S. Department of Agriculture** (1979): *Field manual for research in agricultural hydrology*. Agriculture Handbook n°224.
- Yair, A. & Lavee, H.** (1985): Runoff generation in arid and semi-arid zones. En ANDERSON, M.G. & BURT, T.P. (Eds): *Hydrological Forecasting*, 183-220. John Willey and Sons Ltd.