

IV Reunión de Geomorfología
Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds.
1996, Sociedad Española de Geomorfología
O Castro (A Coruña)

EL EFECTO DE LA ESCALA SOBRE LOS PROCESOS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Ceballos Barbancho, A.¹, Schnabel, S.¹ y Cerdà i Bolinches A.²

¹ Departamento de Geografía y O.T., Universidad de Extremadura, Avda de la Universidad s/n, 10003 Cáceres (Spain).

² Departament de Geografia, Universitat de València, Apartado de Correos 22060, 46080 Valencia (Spain).

RESUMEN

En una pequeña cuenca bajo explotación de dehesa se investiga la generación de escorrentía superficial a distintas escalas. Ello incluye experimentos con lluvia simulada en microparcelas, mediciones del flujo superficial en eventos en 17 parcelas abiertas y una parcela cerrada, y la producción de caudal de la cuenca y una subcuenca. Los coeficientes de escorrentía de las escalas consideradas se agrupan en dos conjuntos: valores bajos para la cuenca y subcuenca, y valores altos a escala de pedón y ladera. Los resultados demuestran que gran parte de la escorrentía producida en las vertientes se infiltra después en las zonas coluviales y fondos de valle. Además indican la importancia de estudiar varias escalas para entender los procesos hidrológicos que operan en cuencas.

Palabras clave: escorrentía superficial, escala, ecosistema dehesa, erosión de suelos.

ABSTRACT

In a small catchment under the so-called dehesa landuse system, the production of surface runoff is investigated at different scales. This includes experiments with simulated rainfall at micro-plots, event-based measurements of overland flow at 17 open plots and 1 closed plot, and discharge production of the catchment and sub-catchment. The runoff coefficients of the considered scales form two groups, with low values for the catchment and sub-catchment and high values for the micro-plots and hillslope plots. The results show that large part of runoff produced at the slopes is infiltrated afterwards at colluvial sites and the valley floors. Furthermore, they indicate the importance of studying at various scales in order to understand the hydrological processes operating in catchments.

Key words: surface runoff, scale, ecosystem dehesa, soil erosion.

INTRODUCCIÓN

Desde 1990 se estudian los procesos sedimentológicos e hidrológicos en una pequeña cuenca hidrográfica representativa de la dehesa extremeña (GÓMEZ AMELIA y SCHNABEL, 1992). La dehesa representa el paisaje típico de la mayor parte del oeste-suroeste español. Alrededor del 52% de la superficie agraria útil de este territorio está ocupado por el sistema dehesa (CAMPOS PALACÍN, 1993). La magnitud de la superficie ocupada, junto con su importancia económica y elevado valor ambiental, justifica la elaboración de todo tipo de estudios cuyos objetivos sean conocer en profundidad el funcionamiento de este tipo de ecosistema.

El presente trabajo se centra 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 de las posibles conexiones existentes entre las mismas. Además, las mediciones realizadas de las tasas de escorrentía a distintas escalas permiten conocer y entender los procesos geomorfológicos al aportar información sobre la forma en que se produce la escorrentía.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de Guadalperalón se sitúa 22 km al noroeste de la ciudad de Cáceres, dentro del término municipal de Trujillo y pertenece a la cuenca del río Magasca, incluida a su vez y de forma progresiva, en la cuenca de los ríos Tamuja, Almonte y Tajo (figura 1). Se halla integrada en la mitad oriental de la unidad geomorfológica de la Penillanura Cacereña (superficie de erosión finimiocena) (GÓMEZ AMELIA, 1985).

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 (si en las vertientes nunca se superan los 40 cm de profundidad, en los fondos de valle se superan los 100 cm en numerosos puntos), una porosidad y densidad de 50,5% y 1,28 gr/cm³ respectivamente, una textura principalmente franca, estructura granular y bajos valores de materia orgánica.

El clima es mediterráneo con influencias tanto oceánicas (atlánticas a través del valle del Tajo) como continentales. Desde el punto de vista termométrico, los inviernos son suaves y los veranos muy calurosos, con una temperatura media anual de 16°C. La precipitación media anual es de 509 mm distribuidos 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.

La densidad del arbolado (*Quercus ilex var. ballota*) es variable. En aquellas vertientes libres de arbolado, con suelos muy poco profundos y afloramientos rocosos, se desarrolla, de forma predominante, el estrato arbustivo de cantueso (*Lavandula stoechas*). El estrato herbáceo (constituido por Leguminosas y Compuestas principalmente) abunda en los fondos de valle. El aprovechamiento principal de la dehesa de Guadalperalón es el ganadero. Durante el año 1994-95, la cabaña ganadera ha estado formada íntegramente

por ovino, raza merina, con una carga de 1,6 cabezas/Ha y un contingente excepcional de 15 cerdos ibéricos durante los tres meses invernales (montanera).

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 133 m³ de volumen, destinada a abrevadero de ganado, nos permite distinguir una subcuenca, en la zona norte, con una superficie de 7,7 hectáreas.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó a distintas escalas dentro de la cuenca de Guadalperalón anteriormente citada. Se realizaron mediciones a escala de pedón (1m²) con lluvia simulada, ladera mediante cajas Gerlach 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 total- (277.237 m²) mediante un aforador. Cada una de estas escalas utilizadas engloba a las restantes.

La precipitación es registrada 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.

La escorrentía de las vertientes se cuantifica por medio de 17 parcelas abiertas (trampas tipo Gerlach de 0,5 m de ancho) distribuidas en 5 unidades caracterizadas por su relación suelo-vegetación (SCHNABEL, en prensa). 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.

La escorrentía superficial generada en la tercera escala de medición -cuenca de drenaje de orden 1 o subcuenca (76.982 m²)- se cuantificó mediante la ejecución de 7 perfiles topográficos transversales y 1 longitudinal para calcular el volumen de la charca y la relación existente entre altura y volumen del agua. En el punto más profundo de la charca se ha colocado una estaca con divisiones centimétricas para medir las fluctuaciones del nivel del agua a las pocas horas de finalizar los eventos de precipitación y así evitar los posibles errores derivados de la infiltración, evaporación y consumo del agua por parte del ganado. Este método permite estimar los caudales generados en la subcuenca norte (CEBALLOS, 1996).

En la salida de la cuenca -cuarta escala de medición (277.237 m²)- 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. Esto nos permite elaborar el hidrograma correspondiente a cada evento y calcular el coeficiente de escorrentía del mismo.

La escorrentía generada a escala de pedón (1m^2) ha sido medida mediante lluvia simulada a una intensidad elevada y en condiciones de máxima sequedad estival (mayo de 1995; humedad media, 2,7%). Se realizaron 20 experimentos con chaparrones de una intensidad de $53,6\text{ mm h}^{-1}$ mantenidos durante una hora sobre 1m^2 de terreno, aunque las mediciones se realizan sólo en la parte central ($0,25\text{ m}^2$) 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 final 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, modelo de CERDÀ (1993) desarrollado a partir del diseñado por CALVO et al. (1988).

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 al último año hidrológico completo monitorizado: 1994-95. Dicho año puede calificarse como de "muy seco" (INM, 1994), con una precipitación total de 331,5 mm. Esta circunstancia ha incidido en un escaso número de eventos con flujo superficial en vertientes (15), en la subcuenca norte (10) y en la salida de la cuenca (7).

Las parcelas abiertas elegidas representan las principales unidades espaciales de la cuenca. Las parcelas 1, 6 y 13 se localizan en vertientes arboladas con densidad variable, suelos con una profundidad inferior a 40 cm 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 cantueso (*Lavandula stoechas*). Los suelos son escasamente profundos ($<10\text{ cm}$) debido a la abundancia de afloramientos superficiales de roca madre. La pendiente media es de $12,6^\circ$. La parcela 18 se sitúa en un área de sedimentación fluvio-coluvial, con suelos profundos (alrededor de 100 cm) y una pendiente media de $10,9^\circ$.

Se han seleccionado aquellos eventos más significativos con escorrentía tanto en las vertientes como en la subcuenca y cuenca, con el fin de poder establecer comparaciones. Para ello, la variable considerada ha sido el coeficiente de escorrentía. Hay que considerar que el cálculo del coeficiente de escorrentía en las vertientes es problemático en el caso de las parcelas abiertas. El área correspondiente a cada caja se ha calculado multiplicando el ancho de la misma (0,5 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.

RESULTADOS

El evento de mayor precipitación total de la serie de datos disponible desde 1990 ha sido de 40,8 mm, registrando una intensidad máxima en 60 minutos de 6,3 mm/h, mientras que el evento de mayor intensidad en 60 minutos ha sido de 18,0 mm/h, con una precipitación total de 21,6 mm.

A escala de pedón, la tabla 1 presenta los coeficientes de escorrentía de las microparcels seleccionadas durante los 30 primeros minutos del experimento (COEF 30 min), suelo seco, y los segundos 30 minutos del mismo (COEF 60 min), suelo saturado. Las intensidades aplicadas en los experimentos tienen un período de recurrencia de 40 años considerando 30 minutos. En el análisis comparativo de escalas se ha optado por los coeficientes en los

primeros 30 minutos del experimento por ofrecer un mayor ajuste a las situaciones más frecuentes en nuestra zona de estudio. Los coeficientes de escorrentía obtenidos son muy altos, a pesar del bajo valor de humedad de los suelos, indicando una escasa capacidad de infiltración.

La producción de escorrentía durante los experimentos ha sido mayor que la registrada en los diferentes eventos en las parcelas abiertas (tabla 2). Esta diferencia puede deberse a la diferencia de escala y/o al hecho de que la intensidad de precipitación de los experimentos sea notablemente superior (tabla 3). Sin embargo, la relación media de los coeficientes de escorrentía de las 17 parcelas abiertas y la intensidad máxima de 60 minutos (figura 2) indica la probabilidad de valores altos ante intensidades similares a la de los experimentos.

A *escala de ladera*, precipitaciones totales superiores a 15 mm producen valores de escorrentía significativos (superiores a 5 litros de media para el conjunto de las 17 parcelas abiertas), mientras que precipitaciones totales inferiores necesitan intensidades superiores a 20 mm/h en 10 minutos (I-10) para generar coeficientes similares. No se ha observado generación de escorrentía superficial con lluvias inferiores a 5,2 mm.

La relación entre precipitación y escorrentía (figura 3), a pesar de ofrecer un coeficiente de regresión significativo ($r^2=0,61$; $N=73$; $ES=5,1$ litros), muestra un alto grado de dispersión respecto de la recta. Incluyendo en el análisis de regresión la intensidad máxima en 60 minutos (I-60), se consigue una mejora en el coeficiente ($r^2=0,75$; $ES=4,1$). En los procesos hidrológicos de vertientes influyen también otros factores. Hay indicios que apuntan a la importancia de la variabilidad temporal de la cubierta vegetal para explicar los procesos hidrológicos. Hasta el presente año hidrológico no se podía comprobar el papel que desempeña la humedad del suelo, por esta razón se está midiendo de forma sistemática esta variable desde el mes de septiembre de 1995. Se ha podido demostrar, además, la influencia de la estructura interna del evento (concentración de las máximas intensidades del evento al comienzo o al final del mismo, discontinuidades de precipitación, etc).

Uno de los grandes problemas encontrados en la investigación ha sido el desbordamiento de los contenedores de las parcelas durante sucesos de gran cantidad e intensidad. En algunos sitios, bidones de 100 l de capacidad no han sido suficientes para recoger el total del agua producida. Esta circunstancia se traduce en errores en los análisis realizados, ya que los valores reales son superiores a los estimados. De modo general, la probabilidad de desbordamiento es de 1 vez al año y acusa una importante variabilidad espacial.

A *escala de cuenca de orden 1 -subcuenca-*, los coeficientes de escorrentía de los 10 eventos monitorizados ofrecen un grado de correlación significativo con la precipitación total ($r^2=0,60$; $N=10$; $ES=0,70\%$), aunque el grado de dispersión respecto de la recta es considerable.

A *escala de toda la cuenca de drenaje*, la relación entre precipitación total y coeficiente de escorrentía no es nada significativa ($r^2=0,22$; $N=60$; $ES=2,23\%$), lo cual impide el establecimiento de cualquier tipo de umbral: mientras una precipitación de 7,4 mm y una I-10 de 33,6 mm/h ha originado un coeficiente de escorrentía de 5,3%, una precipitación de 39,0 mm y una I-10 de 12,0 mm/h no ha generado flujo alguno (0%). La complejidad de los procesos

hidrológicos en la cuenca explica esta falta de relación. La ausencia de correlación entre los coeficientes de escorrentía en vertientes y los de la cuenca, y el hecho de que los primeros sean superiores a los segundos indica que gran parte del agua que fluye por las vertientes es reinfiltrada en los fondos de valle rellenos con material fluvio-coluvial, suelos con una profundidad superior a 100 cm y una pendiente próxima a los 0°.

DISCUSIÓN

Los coeficientes de escorrentía de las 4 escalas consideradas pueden agruparse en dos conjuntos (figura 4). Los pertenecientes a la cuenca y subcuenca norte no sobrepasan el 10% y, a pesar de que la superficie de la cuenca sea 5 veces superior a la de la subcuenca, no existe diferencia alguna entre ambos. Los coeficientes de las microparcels y parcelas no muestran grandes diferencias entre ellos y con la excepción de la parcela 8 superan ampliamente el 10% en la mayoría de los casos (tabla 2).

Al aumentar el tamaño de la superficie productora de la escorrentía, más compleja resulta la explicación de los procesos hidrológicos que operan en las distintas escalas debido a la dificultad de distinguir el peso de los factores que determinan la producción de escorrentía.

Las mediciones realizadas demuestran que en la cuenca de Guadalperalón, desde las vertientes a la salida de la cuenca, hay una pérdida importante de escorrentía superficial debido a la reinfiltración que se produce en las zonas bajas donde el coluvio muestra una alta capacidad de almacenamiento. Si bien la baja capacidad de infiltración de los suelos hace prever la conexión inmediata de la escorrentía generada con el cauce (HORTON, 1940), la existencia de una importante reinfiltración al aumentar el tamaño de la superficie medida, hace pensar que el flujo subsuperficial debe ser importante. De hecho, durante el último período lluvioso (invierno 1995-96) se han encontrado evidencias de la existencia de flujo subsuperficial no sólo en los fondos de valle, sino también en las propias laderas.

Los valores de los coeficientes de escorrentía son mucho más variables cuanto menor es la superficie de medición. En la figura 4 se comprueba como las diferencias entre el coeficiente de escorrentía máximo y mínimo decrece desde la escala de pedón (40% de diferencia) a la de ladera (30%) y a la de cuenca (7-8%).

El cálculo de los coeficientes de escorrentía de las parcelas tiene una serie de dificultades que enumeramos a continuación: a) colmatación de los bidones en eventos de intensidades altas, b) dificultad de estimar el área real de las parcelas abiertas y c) en el recorrido de las vertientes existen una serie de elementos (afloramientos rocosos, vegetación, veredas transversales creadas por el pisoteo del ganado) que alteran la velocidad y la dirección del flujo a lo largo de las mismas.

El presente trabajo es una aproximación orientada a descifrar los mecanismos y modelos de generación de escorrentía, y con ello los procesos de erosión. Es de gran interés que este tipo de estudios prosigan en el futuro con el fin de encontrar las claves que permitan la transferencia de datos de una escala de medición a otra, aunque todo ello debe verificarse con anterioridad mediante mediciones a distintas escalas y bajo diferentes condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto AMB95/0986, financiado por la COMISIÓN INTERMINISTERIAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CICYT).

BIBLIOGRAFÍA

- CALVO, A., GISBERT, B., PALAU, E. y ROMERO, M. (1988): Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En SALA, M. y GALLART, F. (eds): *Métodos y Técnicas para la medición de procesos geomorfológicos*, S.E.G. Monografía 1, pp. 6-15.
- CAMPOS PALACÍN, P. (1993): Valores comerciales y ambientales de las dehesas españolas. *Agricultura y Sociedad* nº66, 9-41. MAPA, Madrid.
- CEBALLOS BARBANCHO, A. (1996): *Escorrentía superficial en un área de dehesa de la provincia de Cáceres. Planteamiento metodológico*. Memoria de Licenciatura. 93 p. Dpto. de Geografía y O.T. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Extremadura, Cáceres.
- CERDÀ i BOLINCHES, A. (1993): *La infiltración de los suelos en el País Valenciano. Factores y variaciones espacio-temporales*. Tesis Doctoral, Universitat de València, 357 pp + apéndices.
- CERDÀ i BOLINCHES, A. (1995): *Factores y variaciones espacio-temporales en la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Geoforma Ediciones, 151p, Logroño.
- 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. y SCHNABEL, S. (1992): Procesos sedimentológicos e hidrológicos en una pequeña cuenca bajo explotación de dehesa en Extremadura. En LÓPEZ BERMÚDEZ, F., CONESA GARCÍA, C. y ROMERO DÍAZ, M^a A. (Eds): *II Reunión Nacional de Geomorfología*, 55-63. S.E.G., Murcia.
- HORTON, R.E. (1940): An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 5, 399-417.
- 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.
- SCHNABEL, S. (en prensa): *Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität hydrologischer und erosiver Prozesse in einem kleinen Einzugsgebiet mit silvo-pastoraler Landnutzung (Extremadura, Spanien)*. Berliner Geographische Abhandlungen, Institut für Geographische Wissenschaften, Berlin.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1979): *Field manual for research in agricultural hydrology*. Agriculture Handbook nº224.

Pies de tablas y figuras

Tabla 1: Coeficientes de escorrentía en los primeros 30 minutos (COEF 30- min) y en los segundos 30 minutos (COEF 60- min). Experimentos de lluvia simulada.

Tabla 2: Coeficientes de escorrentía para eventos de precipitación en diferentes escalas: parcelas abiertas, subcuenca y cuenca.

Tabla 3: Descripción de los sucesos de lluvia: PTOT (precipitación total), I-10, I-30, I-60 (intensidades máximas en 10, 30 y 60 minutos), H1, H3, H14 (cantidad de precipitación registrada en 1, 3 y 14 días anteriores a cada evento).

Figura 1: Localización de la zona de estudio.

Figura 2: Relación entre coeficientes de escorrentía (media de 17 parcelas abiertas) e intensidad máxima en 60 minutos ($r^2=0,38$; $N=73$; $ES=3,1\%$).

Figura 3: Relación entre escorrentía superficial (media de 17 parcelas abiertas) y precipitación.

Figura 4: Relación entre área de cuenca y coeficiente de escorrentía.

Plot	COEF 30- min	COEF 60-min
1	56,0	69,4
6	27,2	45,5
8	20,6	26,6
13	18,0	31,1
18	33,6	40,9

Nº Evento	Coeficiente de Escorrentía (%)						Área (m ²)
	2	4	5	12	15	17	
C01	27,7	6,4	16,1	16,4	5,2	28,2	12,5
C06	31,5	16,9	14,0	18,7	6,1	32,0	11,0
C08	7,3	6,6	4,0	7,0	4,1	7,4	12,5
C13	16,2	15,4	7,9	10,7	14,7	22,2	10,0
C18	13,3	1,6	6,1	1,4	10,6	13,5	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	277237

Nº Evento	2	4	5	12	15	17
PTOT (mm)	27,4	16,2	28,5	19,0	9,2	27,0
I-10 (mm/h)	30,6	15,3		39,7	25,2	32,4
I-30 (mm/h)	22,6	9,8		17,1	10,4	14,8
I-60 (mm/h)	16,8	7,2		8,5	5,4	8,2
H1 (mm)	0,0	0,2	7,2	15,0	0,0	1,4
H3 (mm)	0,0	5,3	16,7	15,4	0,4	1,4
H14 (mm)	16,9	20,9	50,1	15,4	7,2	6,8





