

# ANÁLISIS DE LA DINÁMICA FUENTE-SUMIDERO EN EL FLUJO DE AGUA A VARIAS ESCALAS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

A. G. MAYOR, S. BAUTISTA y J. BELLOT

Dpto. de Ecología, Universidad de Alicante, Apdo. 99, 03080-ALICANTE (España).  
Correspondencia: ag.mayor@ua.es

## Resumen

Los paisajes semiáridos, caracterizados comúnmente por una cubierta vegetal escasa y discontinua, generan una dinámica fuente-sumidero donde las manchas de vegetación se comportan como sumideros de recursos y las zonas desnudas como áreas fuente. Este trabajo analiza el papel de la estructura fuente-sumidero en la respuesta hidrológica de una zona semiárida. En estas zonas, la influencia de la escala en los procesos hidrológicos es especialmente marcada, por lo que se aplicó un diseño jerarquizado para el seguimiento hidrológico a varios niveles: microparcela (0.24 m<sup>2</sup>), parcela (16 m<sup>2</sup>) y cuenca (3-5 ha). El sistema fuente-sumidero se evaluó mediante indicadores funcionales obtenidos a partir de variables relativas al estado de la superficie y a la estructura espacial del sistema. Los resultados sugieren que el estado funcional de fuentes y sumideros y su configuración espacial juegan un papel determinante en la producción de escorrentía. En general, las relaciones fueron más claras a las escalas de mayor detalle. La aparición de nuevos factores de control a escala de cuenca puede explicar que esta relación se pierda a escalas mayores. Nuestro análisis apoya el importante papel del patrón espacial de la vegetación y de las propiedades de superficie en los procesos hidrológicos en zonas semiáridas.

Palabras clave: *indicadores funcionales, patrón espacial, región Mediterránea, respuesta hidrológica, vegetación en mosaico*

## INTRODUCCIÓN

Las zonas semiáridas se caracterizan, en general, por una marcada variabilidad espacial de sus propiedades de superficie. Esta heterogeneidad se debe en gran parte al patrón espacial de la cubierta vegetal (BLACKBURN et al, 1992). Varios autores han documentado que los suelos bajo las manchas de vegetación suelen presentar mayor contenido en materia orgánica, porosidad total y estabilidad de agregados, y menor compactación (GREENE, 1992; BOCHET et al, 1999; PUIGDEFÁBREGAS, 1999; MAESTRE et al, 2001). Estas propiedades afectan a la capacidad de infiltración del suelo y en general a su comportamiento hidrológico y erosivo. Como consecuencia, las tasas de escorrentía y sedimentos en las zonas desnudas suelen ser mayores que en las manchas de vegetación (PUIGDEFÁBREGAS & SANCHEZ, 1996; CERDÀ, 1997; BERGKAMP, 1998; REID et al, 1999; SCHLESINGER et al, 1999). De este modo, se genera una dinámica fuente-sumidero en donde las manchas con vegetación densa se comportan como sumideros, al retener recursos como agua, partículas de suelo y nutrientes, mientras que las zonas desnudas se comportan, en términos relativos, como áreas fuente (TONGWAY & LUDWIG, 1997; MARTÍN et al, 2003). Un ecosistema funcional minimiza las exportaciones de recursos por lo que, en principio, cabe esperar que las variaciones de funcionalidad de los ecosistemas se relacionen de forma inversa con la producción de escorrentía y sedimentos. En la literatura especializada se han propuesto distintos tipos de indicadores para describir el estado funcional de los ecosistemas. Algunos de estos indicadores están basados en la estructura espacial de la vegetación (BASIN et al, 2002) y otros incorporan también propiedades relativas a la superficie (TONGWAY & HINDLEY, 1995; DE SOYZA et al, 1998). Sin embargo, son muy escasos los estudios que han validado experimentalmente la relación de estos indicadores con los flujos reales de agua y otros recursos del ecosistema.

La metodología desarrollada por TONGWAY & HINDLEY (1995) estima el estado funcional del ecosistema mediante indicadores ecológicos sencillos, relativos al estado de la superficie, a partir de los cuales se derivan índices de escorrentía/infiltración, estabilidad y reciclado de nutrientes. Los

índices propuestos por dichos autores reúnen las propiedades que, en general, se recomiendan para los indicadores ecológicos (DALE & BEYELER, 2001) como son: fácil y rápida obtención, sensibilidad a los cambios temporales, amplio rango de aplicación, capacidad predictiva del comportamiento del ecosistema, etc. Este método ha sido aplicado en zonas semiáridas de Australia, Sudáfrica (MCR. HOLM et al, 2002; TONGWAY & HINDLEY, 2000) y, recientemente, en varias zonas de Alicante para identificar umbrales críticos en la funcionalidad del ecosistema (MAESTRE & CORTINA, 2004). En este trabajo utilizamos el índice de escorrentía/infiltración para caracterizar el estado funcional de la estructura fuente-sumidero en diversos tipos de formaciones vegetales en una cuenca semiárida. El potencial de los índices funcionales obtenidos para estimar la capacidad relativa de producir escorrentía se contrastó con medidas de escorrentía realizadas a distintas escalas en la zona de estudio. Este estudio pretende contribuir a definir el papel de la estructura fuente/sumidero como uno de los factores de control del comportamiento hidrológico de las zonas semiáridas.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en una cuenca de 24 hectáreas ubicada en la solana de la sierra de El Ventós, en la localidad de Agost, Alicante. El clima de la zona es mediterráneo semiárido, con una precipitación y temperatura media anual de 302 mm y 18.2° C (Estación Meteorológica de Agost, periodo 1961-1990). En la cuenca de estudio se diferenciaron 3 tipos de unidades ambientales, caracterizadas por formaciones vegetales diferentes: (1) espartales de *Stipa tenacissima*, (2) matorrales degradados dominados por *Brachypodium retusum* y diversas especies sub-arbustivas y (3) matorrales degradados en la zona de cabecera dominados por *S. tenacissima* y *Quercus coccifera* (denominadas en lo sucesivo Espartal, Matorral y Matorral de cabecera, respectivamente). Los afloramientos de roca caliza son abundantes en la zona de estudio, especialmente en la zona de cabecera. Los tres tipos de unidad ambiental mostraron una cubierta vegetal en mosaico en la que las manchas de vegetación, formadas por individuos aislados o agrupaciones de varios individuos, se consideraron sumideros y los espacios situados entre ellos, dominados por suelo desnudo o afloramientos rocosos, se consideraron fuentes. La capacidad de generar escorrentía de las fuentes y sumideros identificados en las unidades ambientales de estudio se estimó mediante el índice funcional de Escorrentía/Infiltración propuesto por TONGWAY & HINDLEY (1995). Este índice estima la capacidad de una superficie para generar escorrentía o, inversamente, su capacidad de infiltración. El índice de Escorrentía se obtuvo a partir de la combinación de una serie de variables relativas al estado de la superficie (Tabla 1), medidas de forma semicuantitativa en 6 cuadrados de 0.5 x 0.5 metros para cada tipo de mancha –fuente o sumidero– y unidad ambiental. El índice de Escorrentía global del paisaje se calculó como la media de los índices de Escorrentía de fuentes y sumideros ponderada por la proporción de superficie que cada tipo de mancha ocupó en el paisaje. La proporción de fuentes y sumideros se estimó contabilizando la longitud total interceptada de cada mancha en transectos (4 por unidad ambiental) de 50 m de longitud dispuestos en el sentido de la máxima pendiente.

El seguimiento hidrológico de la zona experimental se hizo mediante un diseño jerarquizado a varios niveles: microparcela, parcela y cuenca. La Tabla 2 muestra las características principales de las distintas escalas de estudio. A la escala de mayor detalle, se realizaron ensayos de simulación de lluvia en microparcels de aprox. 0.24 m<sup>2</sup> instaladas en áreas fuente y sumideros (n=9) representativos de las unidades ambientales de estudio. Los ensayos se realizaron con un simulador portátil, modificado del descrito por CALVO et al. (1998), en condiciones de suelo seco. La lluvia simulada fue de intensidad constante para cada ensayo y estuvo comprendida entre 40.0 y 53.9 mm h<sup>-1</sup>. La duración de los ensayos fue de 30 minutos y si transcurrido ese tiempo no se había producido escorrentía se prolongaban hasta 60 minutos; la escorrentía producida se midió a intervalos de 1 minuto. Paralelamente, se instalaron parcelas de 16 m<sup>2</sup> en el Espartal y el Matorral y se aforaron de forma independiente tres pequeñas cuencas representativas de dos de las unidades ambientales de estudio: Espartal y Matorral de cabecera. A las escalas de parcela y cuenca (Tabla 1), se midió la escorrentía producida por lluvias naturales durante un periodo de estudio de 27 meses (marzo 2002 - mayo 2004). En las parcelas se midió el total de escorrentía acumulada tras cada lluvia. En las cuencas se instalaron aforadores de escorrentía de tipo V-notch, mediante los cuales se midió la

descarga en continuo.

## RESULTADOS

Las propiedades de superficie fueron muy diferentes entre las áreas fuente y las áreas sumidero. Las manchas de vegetación mostraron mayor recubrimiento de vegetación y de hojarasca que las fuentes, así como menor compactación y mayor estabilidad de la costra superficial (Tabla 3). El índice de Escorrentía derivado de estas propiedades fue significativamente mayor ( $F=101.72$ ,  $p<0.001$ ) en las fuentes que en los sumideros (Figura 1). El tipo de unidad ambiental determinó el índice de Escorrentía de las zonas fuente ( $F=6.025$ ,  $p<0.01$ ), siendo superior en el Matorral de cabecera que en el Matorral, estando el Espartal en una posición intermedia (Figura 1). Sin embargo, el índice de Escorrentía de los sumideros no varió de forma significativa entre las unidades analizadas. La proporción de áreas fuente también fue ligeramente superior en el Matorral de cabecera ( $67.1 \pm 2.9$  %), mientras que el Matorral y el Espartal mostraron valores similares ( $62.1 \pm 3.5$  % y  $59.6 \pm 3.3$  %, respectivamente). Teniendo en cuenta ambos tipos de área, fuentes y sumideros, y sus proporciones relativas, el valor global del índice de Escorrentía calculado para las parcelas de  $16 \text{ m}^2$  fue significativamente mayor ( $F=181.41$ ,  $p<0.001$ ) en el Espartal que en el Matorral (Figura 2). A la escala de cuenca, este índice global fue mayor en el Matorral de cabecera, menor en el Matorral e intermedio en el Espartal (Figura 2), aunque las diferencias fueron marginalmente significativas ( $F=4.781$ ,  $p=0.057$ ).

En los experimentos de lluvia simulada la producción de escorrentía de las fuentes fue claramente superior a la de los sumideros (Figura 1), que no llegaron a producir escorrentía tras 60 minutos de aplicación de lluvia simulada. Se observó un efecto de la unidad ambiental en la respuesta hidrológica de las fuentes (Figura 1), aunque no fue estadísticamente significativo ( $F=4.47$ ,  $p=0.065$ ). Las fuentes del Matorral mostraron valores menores del coeficiente de escorrentía, siendo similares en el Espartal y Matorral de cabecera (Figura 1). El umbral de precipitación para producir escorrentía en las parcelas de  $16 \text{ m}^2$  fue de aproximadamente 4 mm, por lo que hubo un número elevado de lluvias productivas a esta escala. Sin embargo, tan sólo 6 tormentas (un 19% del total de eventos) produjeron más del 60% de la escorrentía medida en cada unidad ambiental. La escorrentía acumulada producida en las parcelas de Espartal fue 2.6 veces mayor que la producida en las parcelas de Matorral, aunque las diferencias no fueron significativas ( $F=3.579$ ,  $p=0.131$ ). A escala de cuenca, tan sólo se produjo escorrentía en tres eventos durante el periodo de estudio, aunque los datos del último evento productivo se perdieron por un fallo en el sistema de almacenaje de datos en la estación de aforo de la cuenca de Espartal. La producción de escorrentía total durante el periodo de estudio fue, al menos, 6 veces mayor en la cuenca de Espartal que en las cuencas de Matorral de cabecera.

## DISCUSIÓN

Los valores del índice de Escorrentía global obtenidos en este trabajo están comprendidos en el rango de valores obtenido por MAESTRE & CORTINA (2004) para un conjunto de espatales semiáridos situados en las provincias de Alicante y Murcia y fueron superiores a los valores del índice de Escorrentía para fuentes y sumideros obtenidos por MCR. HOLM et al (2002) en matorrales degradados de acacia y estepas de zonas semiáridas australianas. De acuerdo con los valores de este índice, las diferencias detectadas en la capacidad potencial para generar escorrentía entre las manchas de vegetación y los espacios semidesnudos que las separan, corroboradas por los datos experimentales, resaltan el importante papel de la estructura fuente/sumidero para determinar el comportamiento hidrológico de las zonas semiáridas (PUIGDEFÁBREGAS et al, 1999). Las variaciones en el índice funcional y en la producción de escorrentía de las áreas fuente en función del tipo de unidad ambiental podrían relacionarse con grados de estrés ambiental y degradación en las diferentes zonas (TONGWAY & LUDWIG, 1997; MAESTRE & CORTINA, 2004). Además del estado funcional de las fuentes, la proporción de fuentes y sumideros también varió entre las unidades ambientales. Esta heterogeneidad espacial del sistema fuente-sumidero determinó la variación funcional entre unidades ambientales.

Las diferencias detectadas por el índice funcional coincidieron con las observadas en la respuesta hidrológica de fuentes y sumideros. Igualmente, las variaciones en el índice de Escorrentía de las zonas fuente en función de la unidad ambiental mostraron un patrón similar en los coeficientes de escorrentía medidos en los experimentos de simulación de lluvia. También a escala de parcela, los valores medidos y los índices de Escorrentía mostraron una misma pauta de variación. Sin embargo, a escala de cuenca no se observó esta correspondencia. Por el contrario, el Matorral de cabecera produjo menor escorrentía y sin embargo mostró un índice de Escorrentía superior. Esta ausencia de paralelismo entre el estado funcional estimado y el comportamiento hidrológico observado a escala de cuenca puede deberse simplemente a que el número de eventos productivos a esta escala es todavía demasiado bajo para describir adecuadamente el comportamiento hidrológico de las cuencas o a la aparición de nuevos factores de control de la producción de escorrentía a escala de cuenca (i.e. pérdidas de transmisión en el cauce, factores topográficos, etc.). La ausencia de concordancia entre índices y valores podría también atribuirse a que en el cálculo del índice de Escorrentía global las manchas de afloramientos se consideraron como fuentes de escorrentía. Sin embargo, parte de estos afloramientos están fracturados, por lo que podrían ser zonas de infiltración preferente y funcionar, por tanto, como sumideros. De este modo, el índice funcional global podría haber infravalorado la capacidad de infiltración del Matorral de cabecera, donde los afloramientos rocosos son particularmente abundantes.

Nuestro análisis apoya el importante papel del patrón espacial de la vegetación y de las propiedades de superficie en los procesos hidrológicos en zonas semiáridas. La validación de indicadores funcionales relativos al comportamiento hidrológico de estas zonas es de gran interés debido a la sencillez y rapidez de su aplicación, que contrasta con el tiempo e inversión económica necesarios para la evaluación de los flujos reales.

## BIBLIOGRAFÍA

- BASIN G.N., LUDWIG, J.A., EAGER, R.W., CHEWINGS, H. & LIEDLOFF, C.; 2002. Indicators of landscape function: comparing patchiness metrics using remotely-sensed data from rangelands. *Ecological Indicators* 1: 247-260.
- BERGKAMP, G.; 1998. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena* 33:201-220.
- BLACKBURN, W.H.; PIERSON, F.B.; HANSON, C.L.; THUROW, T.L. & HANSON A.L.; 1992. The spatial and temporal influence of vegetation on surface soil factors in semiarid rangelands. *Transactions of the ASAE* 35 (2): 479-486.
- BOCHET, E.; RUBIO, J.L. & POESEN, J; 1999. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. *Catena* 38:23-44.
- CALVO, A.; GISBERT, B.; PALAU, E. y ROMERO, M.; 1988. Un simulador de lluvia de fácil construcción. En: Sala, M., Gallart, F. (Eds.), *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, 1: 6-15. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza.
- CERDÀ, A.; 1997. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. On runoff and erosion. *Journal of Arid Environment* 9:27-38.
- DALE V.H. & BEYELER, S.C.; 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators* 1: 3-10.
- DE SOYZA, A.G., WHITFORD, W.G., HERRICK, J.E., VAN ZEE, J.W. & HAVSTAD, K.M.; 1998. Early warning indicators of desertification: examples of tests in the Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environment* 39: 101-112.
- GREEN, R.S.B.; 1992. Soil physical properties of Three Geomorphic Zones in a semi-arid mulga woodland. *Australian Journal of Soil Research* 30:55-69.
- MAESTRE, F.T., BAUTISTA, S., CORTINA, J., BELLOT J.; 2001. Potential of using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. *Ecological Applications* 11: 1641-1655.
- MAESTRE, F.T. & CORTINA, J.; 2004. Insights into ecosystem composition and function in a sequence of degraded semiarid steppes. *Restoration Ecology* 12: 494-502.

- MARTIN, N., BAUTISTA, S., MAESTRE, F.T., CORTINA, J.; 2003. Evaluación del papel de la costra biológica en los flujos de agua en un espartal semiárido: diseño experimental y resultados preliminares. En: VII Congreso Nacional de la AEET. Sistemas Naturales y Cambio Climático. Barcelona.
- MCR. HOLM, A.; BENNET, L.T.; LONERAGAN, W.A. & ADAMS, M.A.; 2002. Relationships between empirical and nominal índices of landscape function in the arid shrubland of Western Australia. *J. Arid Environ.* 50: 1-21.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. & SÁNCHEZ, G.; 1996. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes. En Anderson, M., Brooks, S. (Eds), *Advances in Hillslope processes*, pp. 1027-1060. Wiley, London.
- PUIGDEFÁBREGAS, J.; SOLE, A.; GUTIERREZ, L.; BARRIO, G. & BOER, M.; 1999. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews* 48:39-70.
- REID, K.D., WILCOX, B.P., BRESHEARS, D.D. & MACDONALD, L.; 1999. Runoff and erosion in a Piñon-Juniper woodland: influence of vegetation patches. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 63: 1869-1879.
- SCHLESINGER, W.; ABRAHAMS, A.D.; PARSONS, A.J. & WAINWRIGHT, J.; 1999. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in southern New Mexico: I. rainfall simulation experiments. *Biogeochemistry* 45: 21-34.
- TONGWAY, D.J. & HINDLEY, N.; 1995. *Assessment of soil condition of tropical grasslands.* CSIRO Ecology and Wildlife, Canberra, Australia.
- TONGWAY, D.J. & HINDLEY, N.; 2000. Assessing and monitoring desertification with soil indicators. En: Arnalds, O., Archer, S. (Eds.), *Rangeland Desertification. Advances in Vegetation Sciences* 19: 89-98. Kluwer Academic Publishers, London, UK.
- TONGWAY, D.J. & LUDWIG, J.A.; 1997. The conservation of water and nutrients within landscapes. En: Ludwig J., Tongway D., Freudenberger D., Noble J., Hodgkinson K., (Eds.), *Landscape ecology, function and management: principles from Australia's rangelands*, 2: 17-26. Melbourne, Australia. CSIRO Publishing.

## TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Variables de superficie empleadas en el cálculo del índice funcional de Escorrentía (TONGWAY & HINDLEY, 1995).

<i>Variable</i>	<i>Propiedad a evaluar</i>	<i>Escala de medida</i>
Recubrimiento vegetal	Contribución de la vegetación a retener escorrentía y potenciar la infiltración	Escala 1-4; <1% a >20%
Recubrimiento de hojarasca	Contribución de la hojarasca a retener de escorrentía y potenciar la infiltración	Escala 1-10; <10% a 100% <sup>a</sup>
Microtopografía superficial	Contribución de la rugosidad superficial a retener escorrentía y aumentar la infiltración	Escala 1-5; depresiones de < 3 mm a >100 mm
Compactación superficial corregida	Influencia de la compactación en la reducción de la infiltración	Escala 1-10; suelo muy compactado-suelo suelto <sup>b</sup>
Dispersión de la costra superficial humedecida	Estabilidad de la costra superficial tras una lluvia	Escala 1-4; muy inestable a estable
Textura del suelo	Infiltración y capacidad de almacenamiento de agua	Escala 1-4; arcillosa a arenosa

<sup>a</sup> Con diferentes espesores

<sup>b</sup> Nótese que la escala de esta variable es inversa, por lo que un valor mayor de Compactación superficial corregida implica una mayor capacidad potencial de infiltración

Tabla 2. Características del sistema de seguimiento hidrológico jerarquizado de la zona de estudio.

<i>Escala</i>	<i>Nº de unidades</i>	<i>Superficie (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Uso</i>
Microparcela	9	0.24	Mancha de vegetación
Microparcela	9	0.24	Suelo desnudo
Parcela V3	3	16	Espartal
Parcela V4	3	16	Matorral
Cuenca CAE	1	44000	Matorral cabecera
Cuenca CAW	1	48000	Matorral cabecera
Cuenca ESPARTO	1	31000	Espartal

Tabla 3. Valores medios  $\pm$  SE de las variables de superficie que intervienen en el índice funcional de Escorrentía evaluadas en las fuentes y sumideros identificados en la zona de estudio. N = 6 para fuente y para sumidero.

<i>Variable</i>	<i>Fuente</i>	<i>Sumidero</i>	<i>ANOVA</i>
Recubrimiento vegetal	1.70 $\pm$ 0.10	3.62 $\pm$ 0.09	F = 146.35, p < 0.001
Recubrimiento hojarasca	1.75 $\pm$ 0.15	10.76 $\pm$ 0.58	F = 93.92, p < 0.001
Rugosidad	2.67 $\pm$ 0.09	2.73 $\pm$ 0.09	N. S.
Compactación corregida*	3.49 $\pm$ 0.42	4.94 $\pm$ 0.23	F = 9.93, p = 0.002
Estabilidad costra	3.62 $\pm$ 0.15	3.96 $\pm$ 0.05	F = 5.01, p = 0.031
Textura	2.03 $\pm$ 0.05	2.07 $\pm$ 0.05	N. S.

\* Nótese que un valor mayor para esta variable implica una mayor capacidad potencial de infiltración. N.S.: diferencias no significativas

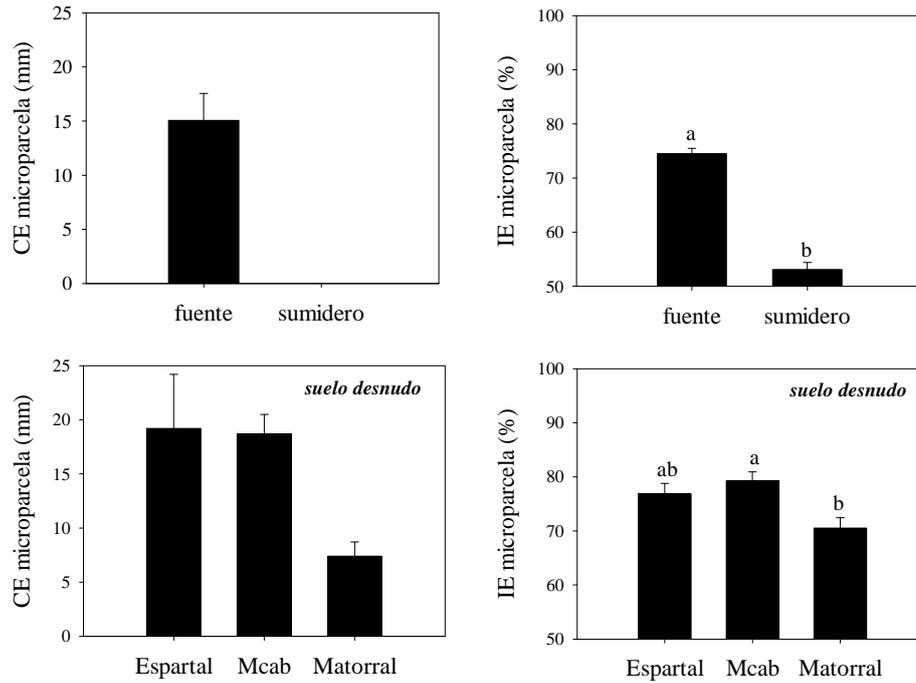


Figura 1. Coeficiente de escorrentía, CE (izquierda), e índice de escorrentía, IE (derecha), a escala de microparcela. CE representa los valores medios ( $\pm$  SE) del coeficiente de escorrentía producida tras la aplicación de lluvia simulada en 9 microparcelas (arriba) por tipo de mancha –fuente o sumidero– o 3 microparcelas (abajo) de suelo desnudo –fuentes– por tipo de unidad ambiental. Letras diferentes indican diferencias significativas. Mcab: Matorral de cabecera.

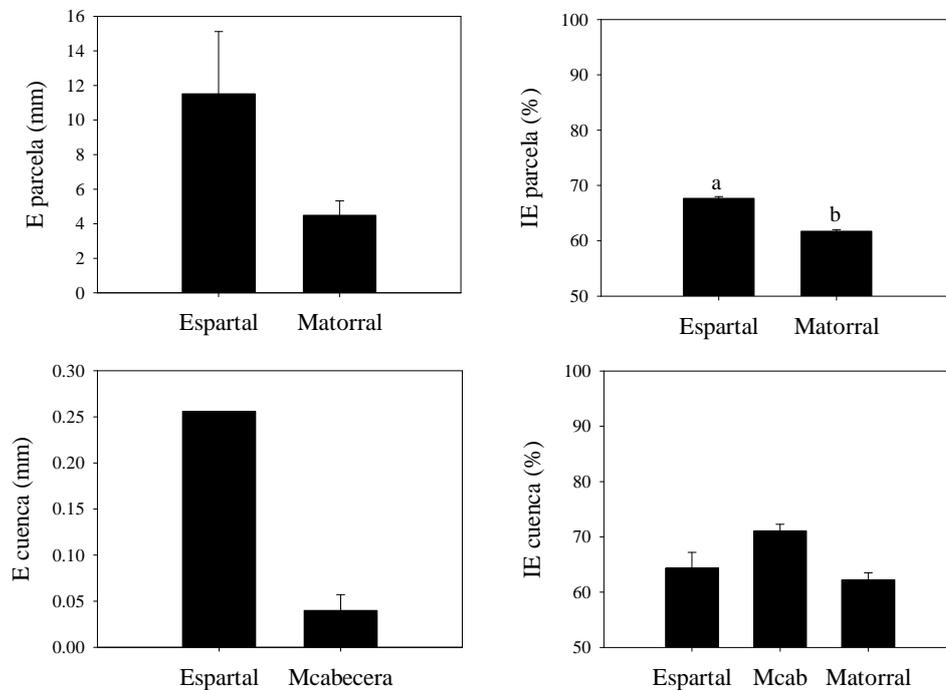


Figura 2. Producción de escorrentía (izquierda) e índices de escorrentía, IE (derecha), para las escalas de parcela y cuenca. E representa la escorrentía acumulada durante un periodo de estudio de 27 meses. Valores medios ( $\pm$  SE). Letras diferentes indican diferencias significativas.