

V Simposio sobre EL AGUA EN ANDALUCÍA

ALMERÍA 25-28 Septiembre 2001

VOLUMEN I



Editores:

Antonio Pulido Bosch
Pablo A. Pulido Leboeuf
Ángela Vallejos Izquierdo



Grupo de Investigación
Recursos Hídricos y
Geología Ambiental



Departamento de
Hidrogeología y
Química Analítica
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



V Simposio sobre el Agua en Andalucía

- © De la edición: *Universidad de Almería.*
Servicio de Publicaciones
- © Del texto: *Los autores*

Obra completa: ISBN: 84-8240-460-1
Volumen I: ISBN: 84-8249-458-X

Depósito Legal: AL-209-2001

Imprime: **arte** impresores, s.l. 18200 MARACENA (Granada)

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA MICROCUENCA EN EL DESIERTO DE TABERNAS. MODELIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA

Y. Cantón¹; F. Domingo²; A. Solé-Benet³ y J. Puigdefábregas³

1. *Departamento de Edafología y Química Agrícola. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería, Almería.*

2. *Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería, Almería.*

3. *Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. Almería.*

RESUMEN. Se ha analizado la respuesta hidrológica a diferentes escalas espaciales de una microcuenca en la zona árida acarcavada (*badlands*) de Tabernas (Almería). A escala de parcela los distintos tipos de superficies (definidas según su tipo de cubierta biótica y abiótica, su topografía y características del suelo) que integran este paisaje presentaron comportamientos hidrológicos contrastados. A escala de microcuenca la escorrentía estuvo controlada principalmente por el tipo de superficie que la componen, su distribución espacial y la intensidad de la precipitación. Se ha desarrollado un modelo espacialmente distribuido que predice la escorrentía de una microcuenca a partir de las tasas de infiltración de las diferentes superficies y de su distribución espacial. El modelo estima bien la generación de escorrentía para eventos sencillos (con uno o dos picos de escorrentía) y permite analizar los flujos de escorrentía entre las distintas superficies y constatar la importancia de los mismos en la respuesta total de la microcuenca.

Palabras clave: *escorrentía, modelo espacialmente distribuido, SIG, paisaje árido acarcavado.*

INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas los estudios en hidrología de laderas, en zonas semiáridas y áridas, demuestran que la generación de escorrentía es espacialmente heterogénea y frecuentemente sólo una pequeña proporción del área de una cuenca contribuye a la escorrentía total. Esta heterogeneidad en la generación de escorrentía está

relacionada con la gran variabilidad espacial en la capacidad de infiltración que a su vez está controlada por las condiciones de superficie del suelo como encostramiento, pavimento de piedras, cobertura vegetal, y que desempeñan un papel fundamental en la generación de escorrentía, en adición a las características de la lluvia (Yair y Lavee, 1985; Berndtsson y Larson, 1987; Wilcox *et al.*, 1990; Yair, 1990; Casenave y Valentin, 1992; Bromley *et al.*, 1997; Solé-Benet *et al.*, 1997).

Para estudiar la escorrentía superficial y subsuperficial, así como los procesos erosivos, las áreas intensamente acarcavadas, conocidas como *malpaís* o *badlands*, constituyen fantásticos laboratorios naturales, en las que el predominio de sus superficies desnudas facilita la observación de dichos procesos como demuestran numerosos trabajos (Bryan y Yair, 1982; Campbell, 1989; Howard, 1994; Bryan, 2000). Además las áreas acarcavadas generan efectos aguas abajo que pueden tener un gran impacto medioambiental (Mathys *et al.*, 1989; Torri y Bryan, 1997) que conviene evaluar.

El desierto de Tabernas, en Almería, constituye una de las zonas de *badlands* más extensas de Europa. Se trata de un paisaje formado por un complejo mosaico de superficies (con y sin vegetación), con una gran variabilidad de cobertura superficial. Experimentos de simulación de lluvia demostraron la gran variabilidad en la capacidad de infiltración de estas superficies (Calvo *et al.*, 1991; Solé-Benet *et al.*, 1997).

Desde 1991 se dispone en dicha zona de una estación experimental, "El Cautivo", donde se estudian los procesos de escorrentía y erosión a diferentes escalas. Aunque los mecanismos de generación de escorrentía y erosión se han estudiado ampliamente en zonas áridas, en general, la mayoría de las medidas de campo y los esfuerzos de modelización se han concentrado en la escorrentía y en la erosión hídrica a escala de parcela, a pesar de que se conocen bien sus limitaciones para la predicción hidrológica. Muchos estudios han mostrado como las características topográficas a escala de cuenca tienen una influencia muy significativa sobre la escorrentía y la erosión (Moore *et al.*, 1991; Conolly *et al.*, 1997; Grayson y Moore, 2000), y los modelos están incorporando diferenciación de áreas y distribuyendo los flujos de agua a través de cuencas y cauces. Pero todavía existe una ausencia considerable de trabajo empírico sobre la distribución espacial de la escorrentía y su transferencia ladera abajo a escala de cuenca para mejorar y validar esos modelos. Y más aún, faltan registros a largo plazo, particularmente para el Mediterráneo, donde la escorrentía y erosión están controladas por eventos extremos de largos períodos de recurrencia y por tanto rara vez coincidentes con el tiempo de duración de los proyectos de investigación (Poesen y Hooke, 1997).

Este trabajo, enmarcado en un programa de experimentación y seguimiento a largo plazo, tiene como objetivos: a) determinar los factores que controlan la generación de escorrentía a diferentes escalas espaciales y temporales y b) construir y validar un modelo de generación de escorrentía espacialmente distribuido. Este modelo pretende identificar las áreas fuente de escorrentía y la contribución de cada superficie a la escorrentía total, a escala de microcuenca, analizar los flujos de escorrentía entre las superficies que componen este paisaje, así como extrapolar resultados a otras áreas del desierto de Tabernas (a escalas similares) para predecir su respuesta hidrológica.

AREA DE ESTUDIO

Los *badlands* de Tabernas se localizan en la provincia de Almería (SE España) en la cuenca de Sorbas-Tabernas, sobre una litología dominante de margas yesíferas.

El clima es termomediterráneo semiárido con una temperatura media anual de 17.8°C y una precipitación media anual de 235 mm con una variación interanual del 37.4% (período 1967-1997; Lázaro *et al.*, 2001), estando por tanto entre las áreas más secas de Europa.

El paisaje está dominado por valles disectados en dirección NW-SE con una marcada asimetría entre las laderas NE y SW. Las laderas NE, de menor pendiente que las SW, están vegetadas, mientras que las SW, muy pendientes, están desnudas o con muy escasa cubierta vegetal (Cantón *et al.*, 2001a).

Estudios previos en la zona (Calvo *et al.*, 1991; Solé-Benet *et al.*, 1997; Cantón, 1999) han permitido agrupar en 6 tipos principales las superficies del suelo en función de su cobertura vegetal, sus características edáficas y topográficas y comportamiento hidrológico y erosivo. La tabla 1 presenta un resumen de estas características.

TIPO	CUBIERTA	CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS	SUELO
PER	Matorral bajo disperso y anuales	Pedimentos a los pies de laderas NE. Curvatura moderada. SLO: 21; ARE: 32	>1m espesor; estruct. Desarrollada; ↑ c.a.a.
STI	Espartal	Laderas abruptas de cabecera Curvatura moderada (cóncava) SLO: 34; ARE: 43	>1m; arenoso; c.a.a. media
CDA	Líquenes y perennes y anuales dispersas	Divisorias, fuerte curvatura (convexa). SLO: 24; ARE: 9	30cm-1m; ↑ c.a.a.
LIQ	Costra líquénica, anuales y perennes bastante dispersas	Parte alta de laderas NE, curvatura moderada a alta (convexa). SLO: 29; ARE: 18	< 30cm; estruct. poco desarrollada; ↓ c.a.a.
LIM	Regolito margoso con limos acostrados líquenes degradados	Laderas SW, fuerte curvatura (convexa). SLO: 39; ARE: 15	< 30cm; sin estruct.; c.a.a. muy baja
MAR	Regolito margoso desnudo	Laderas SW, fuerte curvatura. SLO: 40; ARE: 26	< 30cm; sin estruct.; c.a.a. muy baja

Tabla 1. Principales características topográficas, del suelo y cubierta de las 6 superficies. SLO: Pendiente promedio del total de área que ocupa la superficie. ARE: Área drenada promedio. En las características del suelo se presenta el espesor, grado de desarrollo de la estructura y la capacidad de almacenamiento de agua en la tierra fina (c.a.a.).

MÉTODOS

El trabajo experimental se llevó a cabo en el área instrumentada de "El Cautivo", de unas 13 ha, a una altitud entre 247.5 m y 382.5 m. Se seleccionó una microcuenca (1.88 ha) llamada microcuenca 1 y otras tres, más pequeñas, subcuencas de la 1:

la microcuenca 2 (225 m²), la 3 (62 m²) y la 4 (5775 m²). Las microcuencas 2 y 3 drenan cárcavas elementales, desprovistas de vegetación (la 2 constituida por: 49.8% MAR, 29.3% LIM, 16.4% PER y 4.5% LIQ), y la microcuenca 3 constituida 100% por MAR.

La microcuenca 4, en la cabecera de la 1, constituye casi la tercera parte de la microcuenca 1 y está básicamente formada por superficies vegetadas (97%). La microcuenca 1 comprende todos los tipos de superficies: 52% superficies vegetadas (PER, STI) con capacidades de infiltración medias a altas, 25.5% superficies desnudas (MAR, LIM) y 22.3% dominadas por líquenes (LIQ), las tres últimas con baja capacidad de infiltración.

Medidas de escorrentía.

A escala de parcela.

Sobre cada tipo de superficie (excepto STI) existían pequeñas parcelas (dos por término medio) circulares y cerradas, de 0.24 m², conectadas a un depósito de 50 L en la desembocadura. Después de cada lluvia se midió la escorrentía total. El periodo de seguimiento de estas parcelas fue de Mayo de 1994 a Junio de 1997.

A escala de ladera y pequeña cuenca.

Cuatro aforadores tipo H (Brakensiek et al., 1979) instalados a la salida de cada una de las microcuencas (fig. 1), denominados F1, F2, F3 y F4, permitieron analizar la respuesta a escala de ladera y microcuenca. Cada aforador está equipado con una sonda capacitiva para la medida continua del nivel de agua.

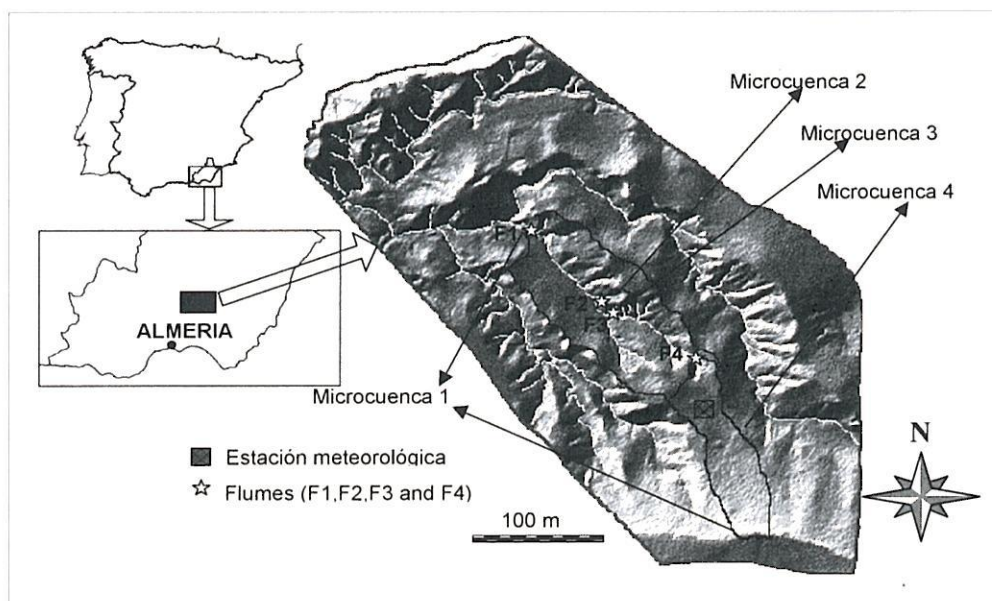


Figura 1. Estación de campo "El Cautivo" (mapa compilado del Modelo Digital de Elevaciones a 1 m de resolución). Se representan las cuencas instrumentadas correspondientes a los aforadores H (F1, F2, F3 y F4) y la estación meteorológica.

Tres pluviómetros y un pluviógrafo automático miden el volumen total de lluvia por evento y la intensidad.

El sistema de adquisición de datos está basado en una red digital de baja velocidad que consiste en varias estaciones microprocesadoras remotas Motorola MC68Hco5/11 y una unidad central conectada a un PC (Vidal et al., 1996). Todos los datos generados por la estación meteorológica y las 4 estaciones de los aforadores tipo H se centralizan y transmiten en tiempo real a la Estación Experimental de Zonas Áridas (CSIC) en Almería.

Modelización de la escorrentía-infiltración.

El modelo de escorrentía espacialmente distribuido que se ha desarrollado está basado en las tasas de infiltración de cada tipo de superficie y en la intensidad de la lluvia.

Estudios previos en Tabernas (Calvo et al., 1991; Solé-Benet et al., 1997) demostraron que al igual que en otras zonas semiáridas (Dune y Leopold, 1978; Yair y Lavee, 1985; Peugeot et al., 1997; Puigdefábregas et al., 1998), la escorrentía se genera cuando la intensidad de la lluvia excede la tasa de infiltración. El modelo asume que éste es el único mecanismo responsable de la generación de escorrentía en el área de estudio.

El modelo utiliza la ecuación de infiltración de Horton (1940):

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-at}$$

donde f_t es la tasa de infiltración (mm h^{-1}) a tiempo t , f_c es la tasa final de infiltración (mm h^{-1}), f_0 es la tasa inicial de infiltración (mm h^{-1}), a es una constante empírica que expresa la disminución exponencial de la tasa de infiltración y t es el tiempo acumulado (h).

El modelo usa 2 ecuaciones de infiltración diferentes para cada superficie (en función de la humedad antecedente: suelo seco o húmedo), basándose en el hecho demostrado de que diferentes condiciones humedad antecedente, previas al evento, generan cambios en las tasas de infiltración finales (Bowyer-Bower, 1993). Se supone que todas las celdas ($1\text{m} \times 1\text{m}$) que forman un tipo de superficie tienen el mismo comportamiento hidrológico. También se considera que, a escala de evento lluvioso, la pérdida de agua por interceptación y transpiración de la vegetación y por evaporación del suelo son despreciables, en comparación con la entrada de agua al sistema durante una lluvia (Sharma et al., 1996). El modelo se ejecuta a intervalos de tiempo de 2 minutos.

El modelo calcula la evolución del contenido de agua en el suelo durante el evento, en cada tipo de superficie, para decidir qué ecuación de infiltración usa en cada superficie.

La escorrentía se calcula como:

$$R_j = I_j - f_j$$

donde R_j es la escorrentía para cada pixel en el intervalo de tiempo j (mm h^{-1}) y I_j es la intensidad de la lluvia (mm h^{-1}) en el intervalo de tiempo j . La intensidad de la

lluvia para cada intervalo de tiempo (I_2) es una variable conocida que se introduce en el modelo.

A escala de cuenca el exceso de lluvia simulado en cada celda es enviado aguas abajo, distribuyéndose sobre el mapa de la red local de dirección de drenaje (obtenido a partir del modelo digital de elevaciones con 1 m de resolución) al final de cada intervalo de tiempo. Parte de esta escorrentía puede infiltrarse en celdas aguas abajo, dependiendo de la capacidad de infiltración de dichas celdas en ese momento. El volumen de escorrentía que se infiltra en una celda aguas abajo, es una nueva entrada de agua en el suelo para esa celda, con lo que aumenta su contenido final de agua en el suelo y se tiene en cuenta en el paso siguiente.

El modelo está escrito en *PCRaster Dynamic Modelling Language* (Karssenberg, 1996; van Deursen y Wesseling, 1996), un lenguaje de programación integrado en el Sistema de Información Geográfica PC-RASTER (van Deursen y Wesseling, 1996).

Para validar el modelo se usaron las medidas de escorrentía registradas a escala de pequeña parcela y de microcuenca (mediante los aforadores tipo H, F1, F3 y F4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de 6 años hidrológicos (desde 1 de Octubre a 30 de Septiembre) consecutivos que van desde 1991-92 hasta 1996-97.

Los datos de precipitación registrados en la zona de estudio durante dicho periodo mostraron una precipitación anual promedio de 251 mm año⁻¹ (C.V.=39%). Las precipitaciones más frecuentes fueron las de pequeño volumen (el 53% fueron de ≤ 1 mm, el 86% de ≤ 10 mm y sólo el 2% excedieron 50 mm). El umbral de lluvia requerido para generar escorrentía varió entre 3.5 mm y 14.2 mm, siendo la moda estadística 9 mm. La máxima intensidad de lluvia en 5 minutos (I_5) registrada durante el periodo fue 55.9 mm h⁻¹. Sólo el 16% de las precipitaciones presentaron una I_5 máxima superior a 15 mm h⁻¹.

Escorrentía a escala de parcela.

La figura 2 muestra los coeficientes de escorrentía medidos en las parcelas durante todo el periodo de estudio, donde se pueden apreciar diferencias entre los distintos tipos de superficie. Las superficies con mayores tasas de escorrentía fueron MAR y LIQ, mientras que PER y CDA presentaron los menores coeficientes de escorrentía. Aunque CDA tiene una cubierta líquénica similar a LIQ presentó una mayor capacidad de infiltración por estar situada en divisorias con poca pendiente.

La escorrentía aumentó con el volumen e intensidad de la precipitación en todas las superficies. La figura 3 muestra el aumento de la escorrentía con la intensidad de la lluvia para la superficie MAR.

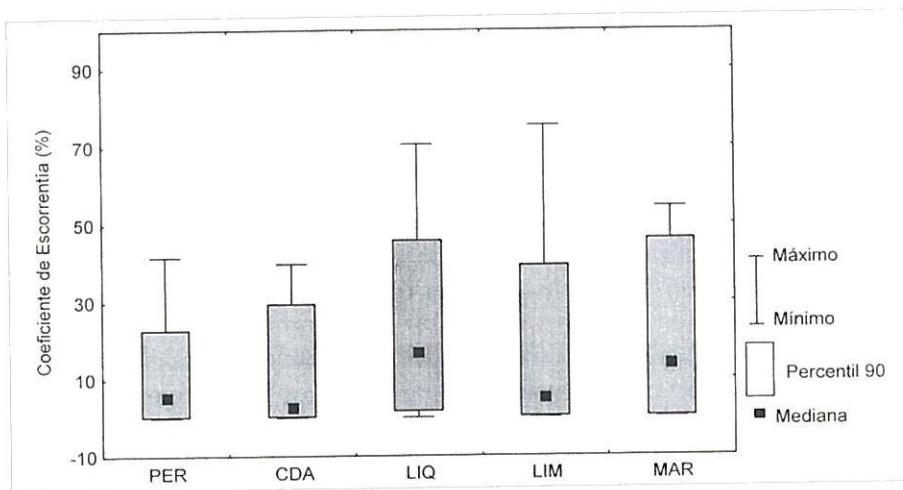


Figura 2. Distribución de los coeficientes de escorrentía de cada superficie para todos los eventos registrados durante el periodo de estudio.

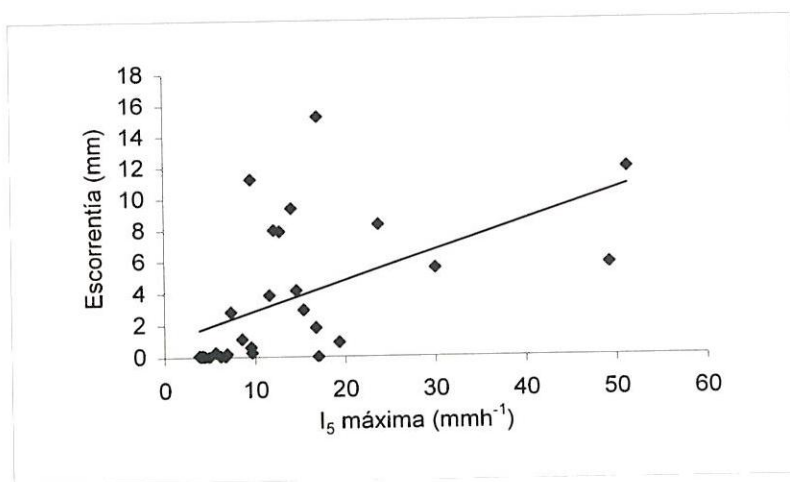


Figura 3. Intensidad (I_5) máxima de cada evento frente a la escorrentía total por evento para la superficie MAR.

Se comprobó que cuanto mayor era la capacidad de la superficie para generar escorrentía mayor fue la pendiente de la ecuación de regresión (b) entre la escorrentía y el volumen de precipitación, disminuyendo b en el siguiente orden: MAR ($b = 0.41$), LIQ ($b = 0.38$), LIM ($b = 0.29$), CDA ($b = 0.25$) y PER ($b = 0.11$). Aunque todas estas regresiones son significativas (p.e. para MAR, $F_{1,27} = 62.1$ $p < 0.0000$, $r^2 = 0.7$), algunos puntos divergen de esta tendencia. Estas desviaciones, que también se observan a escala de microcuencia, se han descrito también en otras zonas áridas y se explican porque los eventos lluviosos en este tipo de áreas con frecuencia están compuestos por varias lluvias cortas de unos pocos milímetros (Yair, 1990) que pueden generar escorrentía rápida pero discontinua (Yair y Lavee, 1985). Otro factor es la forma-

ción de costras (muy abundantes en estas superficies) que afectan a la heterogeneidad de los procesos tanto de escorrentía como de erosión.

Escorrentía a escala de microcuenca.

Escorrentía.

Para un mismo episodio lluvioso la escorrentía fue diferente en las cuatro microcuencas, lo que se explica por la escala y por las proporciones de los tipos de superficies que las componen. La figura 4 muestra estas diferencias para el evento del 31 de Octubre de 1993.

Las microcuencas 2 y 3, compuestas mayoritariamente por la superficie MAR, presentaron los coeficientes de escorrentía más elevados. Los coeficientes de escorrentía para los eventos registrados durante el periodo de estudio oscilaron entre 10.7% a 73.2% en la microcuenca 3, completamente desprovista de vegetación, y entre 4.4% y 61.2% en la microcuenca 2 (una cuarta parte vegetada). La microcuenca 4 está integrada por superficies vegetadas (STI y PER) caracterizadas por alta infiltración y los coeficientes de escorrentía se situaron entre 0.03% y 4.1%.

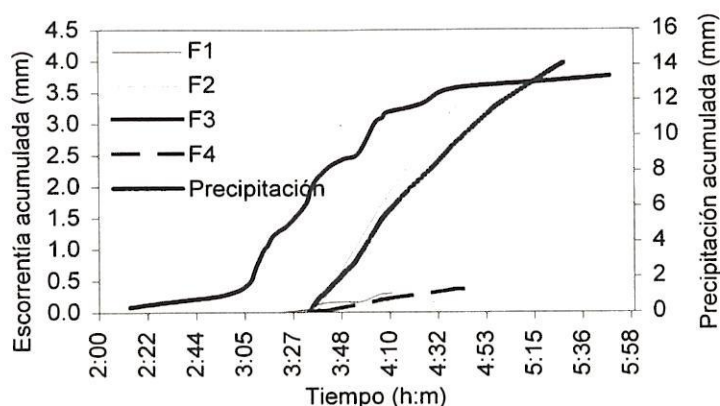


Figura 4. Escorrentía y precipitación acumulada en las 4 microcuencas en el evento 31/10/1993.

En la microcuenca 1 los caudales variaron entre 0.04 L s^{-1} y 90.7 L s^{-1} y los coeficientes de escorrentía entre 0.01% y 15.2%, que se explican por el mosaico de superficies que la constituyen, en el cual superficies no vegetadas y/o con líquenes, ambas con elevados coeficientes de escorrentía, coexisten con superficies vegetadas con bajos coeficientes de escorrentía.

La comparación del hietograma y el hidrograma en los eventos registrados puso de manifiesto el control de la intensidad de la lluvia sobre la escorrentía (fig. 5).

Los picos de intensidad de lluvia generaron picos de escorrentía proporcionales a la magnitud de la intensidad (fig. 6). Esto indica que, como en la mayoría de zonas semiáridas, el principal mecanismo de generación de escorrentía en el área acarca-

vada de Tabernas es de tipo *hortoniano* (Dunne y Leopold, 1978; Abrahams *et al.*, 1989; Peugeot *et al.*, 1997; Puigdefábregas *et al.*, 1998).

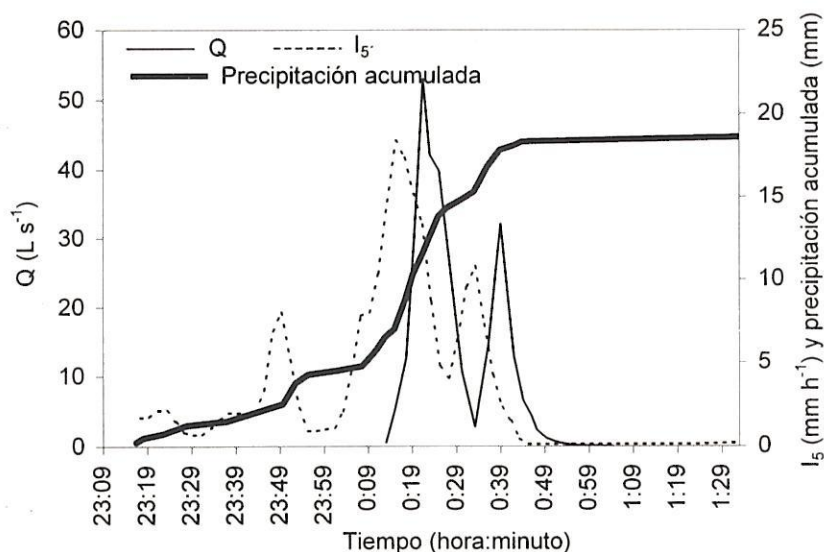


Figura 5. Hietograma, hidrograma y precipitación acumulada para el evento del 15 de Octubre de 1994 en la microcuenca 1.

Asimismo se comprueba que la escorrentía aumenta con la precipitación pero a diferente tasa en las 4 microcuencas.

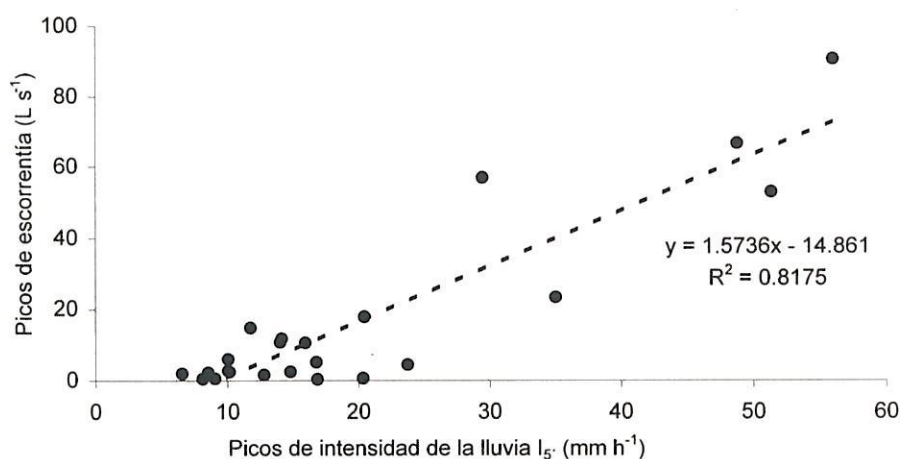


Figura 6. Relación entre los picos de máxima escorrentía por evento y su correspondiente pico de intensidad de la lluvia (I_5) en la microcuenca 1.

Simulación de la escorrentía.

Para analizar la contribución de cada tipo de superficie a la escorrentía total de la microcuenca 1, el modelo de escorrentía creado se aplicó para 10 eventos de escorrentía registrados entre 1991-92 y 1996-97. En la tabla 2 se presentan la escorrentía total observada y estimada para los eventos simulados. Cuando el evento fue *sencillo*, es decir con sólo uno o dos picos de escorrentía el modelo se ajustó bien a la realidad (fig. 7) y el error relativo en la estimación de la escorrentía total osciló entre el 1% y el 15%. Sin embargo para eventos *complejos* (es decir compuestos por varios picos de escorrentía) las diferencias entre la escorrentía total real y la simulada fueron mayores, hasta un 44%.

En los eventos complejos el modelo no se ajustó bien a la realidad, debido a que esos eventos están compuestos por varias lluvias de diferente magnitud e intensidad (aguaceros) generando escorrentía discontinua. Estos aguaceros consecutivos pueden estar separados por intervalos de tiempo de menos de unos minutos a más de una hora, tiempo suficiente para que el suelo drene, disminuyendo su humedad, y aumente la variabilidad espacial en la generación de escorrentía (Yair y Lavee, 1985). Además esta forma de precipitación conlleva una mayor variabilidad en la intensidad de la lluvia y crea humedades antecedentes diferentes afectando a la tasa de infiltración estable (f_c) (Bowyer-Bower, 1995), induciendo a un error de la estima del modelo al trabajar éste con un único valor de f_c .

Fecha	Precipitación (mm)	I_5 (mm h ⁻¹)	Número de picos	E observada (mm)	E simulada (mm)	Error relativo (%)
19/02/92	52.27	55.9	1	3.63	3.67	1.14
13/06/92	40.61	13.4	7	0.54	0.39	27.49
21/06/92	30.84	19.9	2	1.35	1.15	15.17
7/11/92	87.56	29.4	11	13.31	7.46	44.01
1/02/93	18.86	13.4	3	0.18	0.20	14.71
31/10/93	13.94	17.4	2	0.28	0.24	12.07
16/02/94	65.57	10.0	14	2.33	1.57	32.66
28/02/94	18.85	14.8	2	0.16	0.16	2.39
16/10/94	21.87	51.3	2	2.09	2.23	6.46
1/02/96	20.60	14.1	3	0.86	0.77	10.09

Tabla 2. Escorrentía total observada (O) y simulada (S) y error relativo ($(O - S)/O$) (en %) para los 10 eventos simulados. Se presenta también la precipitación total, máxima intensidad de la lluvia (I_5) y número de picos de escorrentía en el evento.

El modelo genera en cada intervalo de tiempo (2 minutos) un mapa con la tasa de escorrentía en cada una de las celdas que componen la microcuenca (1 m x 1 m). La figura 7 muestra los mapas para los momentos marcados en el hidrograma del evento del 16/10/1992 en la microcuenca 1. El análisis de estos mapas para eventos *sencillos* permite conocer los flujos de escorrentía entre superficies. Por ejemplo, los mapas de la figura 7, al igual que para otros eventos analizados, muestran que normalmente no se genera escorrentía en las superficies vegetadas con anuales y perennes dispersas (PER), mientras que las superficies no vegetadas (MAR y LIM) generan la

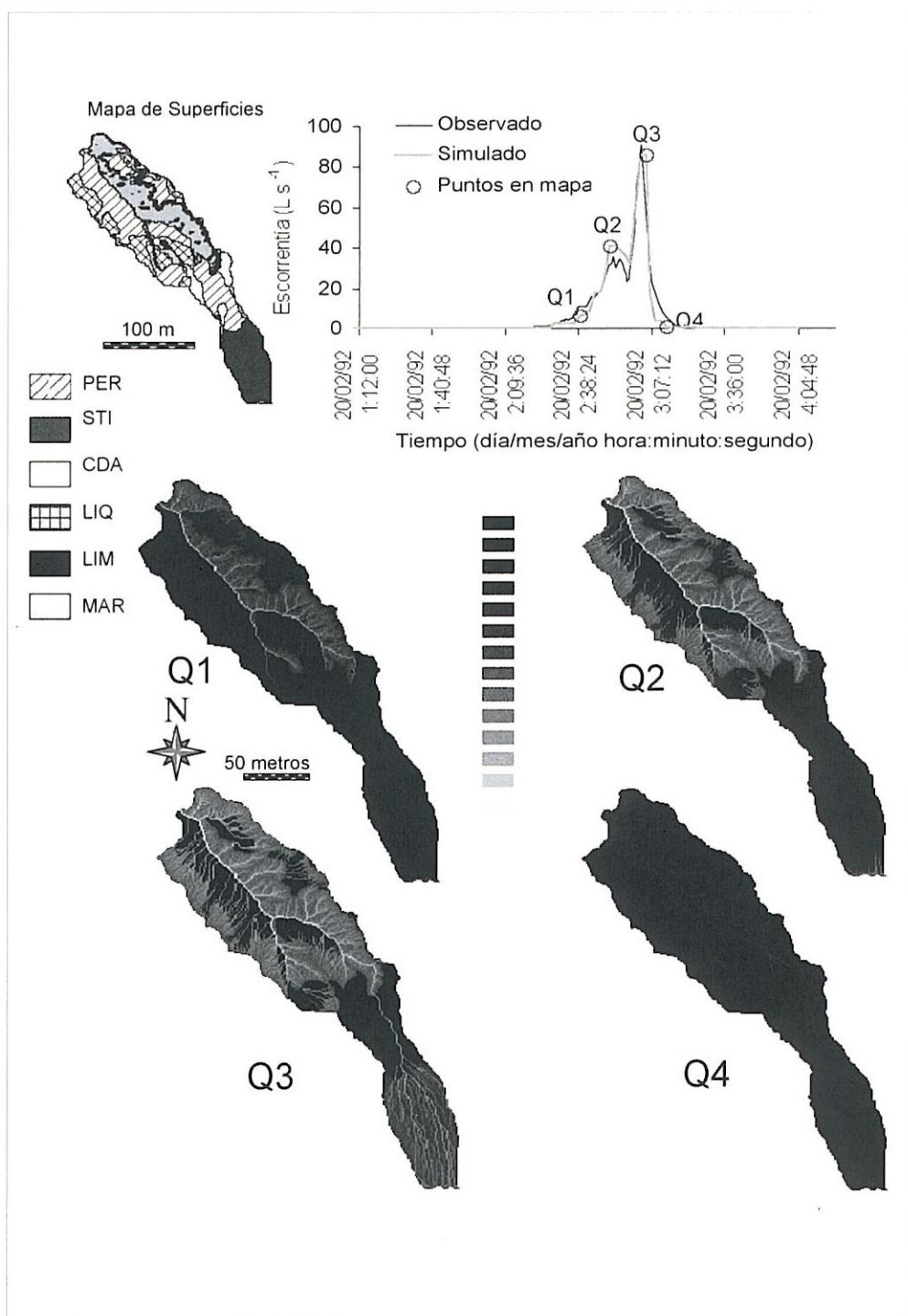


Figura 7. Hidrograma real y simulado para evento 20/2/92 para la microcuenca 1. Se presenta el mapa de superficies de la microcuenca y mapas de caudal en algunos puntos.

mayor parte de la escorrentía de la microcuenca 1. La superficie LIQ (con cubierta criptogámica) se caracteriza por altos coeficientes de escorrentía (fig. 2), pero al mismo tiempo reducen las pérdidas de suelo por erosión (Cantón et al., 2001b). La escorrentía generada por estos líquenes puede erosionar aguas abajo. Las simulaciones del modelo (p.e. mapas Q2 y Q3 de la fig. 7) demuestran que la mayoría de escorrentía generada en la superficie LIQ (al igual que ocurre con STI) se infiltra en la superficie PER situados aguas debajo de LIQ (y STI) reduciendo de esta forma el riesgo de erosión y constituyendo un aporte importante de agua para el matorral aguas abajo (PER).

Sólo durante momentos específicos de alta intensidad de la lluvia (picos importantes de escorrentía), la escorrentía generada en LIQ se concentra en determinadas zonas y alcanza los cauces. El modelo muestra como la escorrentía se concentra en los surcos, de la superficie MAR (fig. 7) aunque también se genera escorrentía en las áreas inter-rills, especialmente durante eventos de alta intensidad.

El modelo de escorrentía-infiltración que se presenta permite evaluar la contribución de cada superficie (y de cada celda de 1x1m que forma la microcuenca), generando mapas de escorrentía acumulada (cada intervalo de tiempo al mapa de escorrentía se le suma el del intervalo anterior y así sucesivamente) y obteniéndose al final del evento un mapa con la escorrentía total en cada celda. La figura 8 muestra la escorrentía acumulada en la microcuenca 1 y al final del evento 16/10/92. Los diferentes tonos de gris en las distintas superficies ponen de manifiesto una contribución diferencial de cada superficie y de cada celda.

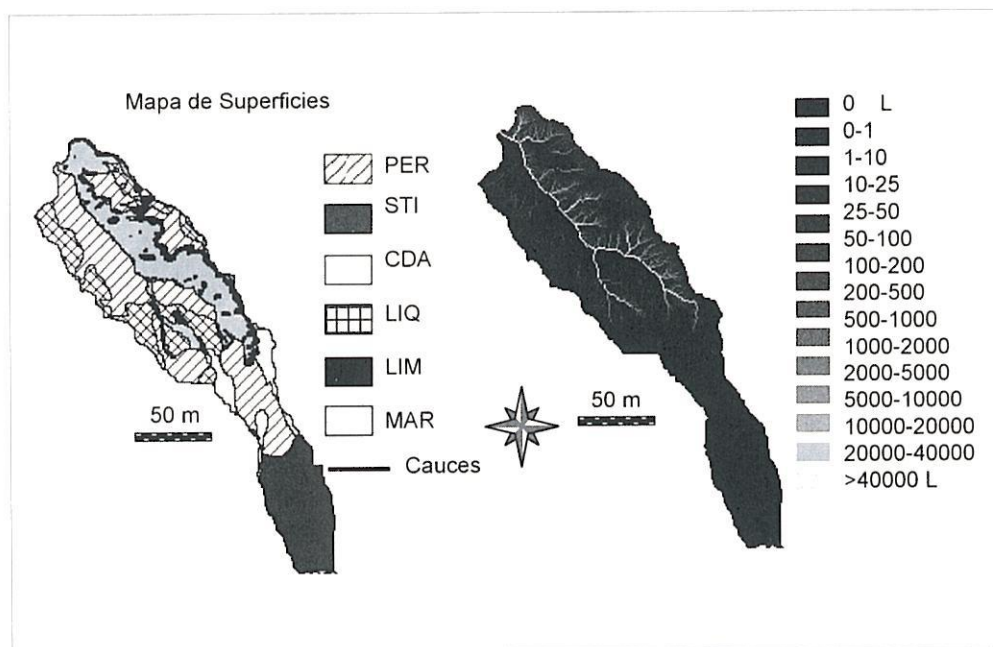


Figura 8. Mapa de escorrentía acumulada (L) en cada celda (1x1m) al final del evento 16/10/92 en la microcuenca 1. También se presenta el mapa de superficies de la microcuenca 1.

CONCLUSIONES

Las distintas superficies que integran la microcuenca estudiada en la zona árida acarcavada (*badlands*) de Tabernas (Almería), presentan comportamientos hidrológicos diferentes, siendo las no vegetadas las más eficientes en la producción de escorrentía, mientras que las vegetadas presentan altas tasas de infiltración (excepto superficies con cubierta criptogámica, en posición de ladera, que presenta coeficientes de escorrentía muy elevados). Este comportamiento se extrapola a escala de microcuenca, comprobándose que la escorrentía de la misma está controlada por los tipos de superficies que la integran y por su organización espacial.

Se ha comprobado también el efecto de las características de la precipitación (volumen e intensidad) sobre la escorrentía a ambas escalas. La escorrentía aumenta con la intensidad de la precipitación y con la magnitud de la misma.

La modelización espacial de la escorrentía en un Sistema de Información Geográfica ha puesto de manifiesto que las superficies que integran este paisaje constituyen un mosaico de unidades de respuesta hidrológica contrastadas donde sólo algunas zonas generan escorrentía (y por lo tanto sedimentos), y parte de la escorrentía generada en estas zonas desembocan en zonas capaces de reabsorberla.

En definitiva la respuesta hidrológica y erosiva de este paisaje está controlada aparte de por los tipos de superficies y por su organización espacial, por la cantidad de precipitación y la intensidad de la misma. La baja frecuencia de precipitaciones capaces de generar escorrentía o eventos de gran energía y la presencia de superficies capaces de reabsorber parte de la escorrentía generada aguas arriba provoca que las tasas de erosión sean menores de lo que se podría suponer a simple vista (Cantón *et al.*, 2001b).

El modelo de escorrentía espacialmente distribuido presentado permitirá generar predicciones (a una escala similar a la estudiada) sobre la contribución de otras zonas del área acarcavada del desierto de Tabernas, así como simular eventos de precipitación extremos y emitir hipótesis acerca de sus consecuencias ayudando a la comprensión de la dinámica de este paisaje.

AGRADECIMIENTOS

Las instalaciones de campo y los trabajos realizados se han llevado a cabo gracias a varios proyectos: MEDALUS III financiado por la Comunidad Económica Europea, Programa de Medioambiente (ENV4-CT95-0118), PROHIDRADE (Procesos hidrológicos en ambientes Mediterráneos frágiles o degradados) financiado por el Plan Nacional de I+D (Medioambiente) (AMB95-0986-C02-01); y EPOHIDRO (Estaciones permanentes para el estudio de los procesos hidrológicos en ambientes mediterráneos) (HID98-1056-C02-01) financiado por el Plan Nacional de I+D (Medioambiente) (Recursos Hídricos). El primer autor fue financiado por una beca predoctoral del MEC. Le agradecemos a Sebastian Vidal haber proporcionado la instrumentación esencial para el proyecto y a Alfredo Duran y Enrique Cortés su ayuda en los trabajos de

campo. Especialmente agradecemos a los propietarios, la familia Viciano, el habernos permitido usar sus propiedades como "estación experimental".

REFERENCIAS

- Abrahams, A. D., Parsons, A. J. y Luk, S. (1989). Distribution of overland flow on desert hillslopes and its implications for modelling erosion. *J. Hydrology* 106: 177-184.
- Berndtsson R. y Larson M. (1987). Spatial variability of infiltration in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology* 90: 117-133.
- Bowyer-Bower T. A. S. (1993). Effects of rainfall intensity and antecedent moisture on the steady-state infiltration rate in a semi-arid region. *Soil Use and Management* 9: 69-76.
- Brakensiek, D.L., Osborn, H.B. y Rawls, W.J. (Coordinadores), 1979. Field manual for research in agricultural hydrology. Agriculture Handbook, 224. USDA, 550 pp.
- Bromley J., Brouwer J., Barker A.P., Gaze S.R. y Valentine C. (1997). The role of surface water redistribution in an area of patterned vegetation in a semi-arid environment, South-West Niger. *Journal of Hydrology* 198: 1-29.
- Bryan, R. B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32: 385-415.
- Bryan, R. B. y Yair, A. (1982). Perspectives on studies of badland geomorphology. In: Bryan, B.R., Yair, A. (Eds.). *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books. 1-12p. Norwich.
- Calvo A., Harvey A.M., Paya-Serrano J. y Alexander R.W. (1991). Response of badlands surfaces in South East Spain to simulated rainfall. *Cuaternario y Geomorfología* 5: 3-14.
- Campbell, I. A. (1989). Badlands and badlands gullies. In: David S.G. Thomas (Ed.). *Arid Zone Geomorphology*. John Wiley & Sons. 159-183p. London
- Cantón, Y. (1999). Efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en paisaje de cárcavas. Tesis doctoral (en prensa). Universidad de Almería, España, 390 p.
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., Queralt, I. y Pini, R. (2001a). Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment in SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches. *Catena* 44:111-132.
- Cantón, Y. Domingo, F., Solé-Benet, A. y Puigdefábregas, J. (2001b). Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *J. Hydrology* (in press).
- Casenave A. y Valentin C. (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology* 130: 231-249.
- Connolly, R. D., Silburn, D. M. y Ciesiolka, C. A. A. (1997). Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using rainfall simulator data. III. Application to a spatially complex catchment. *Journal of Hydrology* 193: 183-203.
- Dunne, T. y Leopold, L. B. (1978). *Water in environment planning*. Freeman, San Francisco.
- Grayson, R. y Moore, I. (2000). *Effect of land-surface configuration on catchment hydrology. Overland flow-hydraulics and Erosion Mechanics*. University College London. 147-175 p.
- Horton, R.E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 5: 399-417.
- Howard, A.D. (1994). Badlands. In: Abrahams, A.D. y Parsons, A.J. (Eds.). *Geomorphology of Desert Environments*. Chapman & Hall. 213-242p. London.
- Karssen DJ. (1996). *Manual PCRaster Version 2*. Utrecht, The Netherlands: Dept. Physical Geography, Utrecht University.

- Lázaro, R., Rodrigo, F.S., Gutiérrez, L., Domingo, F. y Puigdefábregas, J. (2001). Analysis of a thirty year rainfall record (1967-1997) from semiarid SE Spain: a plant ecological perspective. *Journal of Arid Environments*, 48: 373-395.
- Mathys, N., Meunier, M. y Guet, C. (1989). Mesure et interprétation du processus d'érosion dans les marnes des Alpes du Sud à l'échelle de la petite ravine. *La Houille Blanche* 3-4: 188-192.
- Moore ID, Grayson R.B. y Ladson A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5: 3-30.
- Peugeot, C., Esteves, M., Galle, S., Rajot, J.L. y Vandervaere, J.P. (1997). Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *Journal of Hydrology* 188-189: 179-202.
- Poesen, J.W.A. y Hooke, J. (1997). Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography* 21: 157-199.
- Puigdefábregas, J., Del Barrio, G., Boer, M., Gutiérrez, L. y Solé-Benet, A. (1998). Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area. *Geomorphology* 23: 337-351.
- Sharma K.D., Menenti M., Huygen J. y Fernandez P.C. (1996). Distributed numerical rainfall-runoff modelling in an arid region using thematic mapper data and a geographical information system. *Hydrological Processes* 10: 1229-1242.
- Solé-Benet, A., Calvo, A., Cerdá, A., Lázaro, R., Pini, R. y Barbero, J. (1997). Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena* 31: 23-28.
- Torri, D. y Bryan, R.B. (1997). Micropiping processes and bianca evolution in southeast Tuscany, Italy. *Geomorphology* 20: 219-235.
- van Deursen W.P.A. y Wesseling C.G. (1996). PCRaster. Version 2. Utrecht, The Netherlands.
- Vidal, S., Solé-Benet, A., Lázaro, R., Duran, A. y Puigdefábregas, J. (1996). Estaciones automáticas de aforo y muestreo de caudales, de bajo costo y mantenimiento, para zonas remotas. En: Instituto Tecnológico Geominero de España (Ed.). IV Simposio sobre el Agua en Andalucía, vol. I, 193-203 p. Almería.
- Wilcox B.P., Rawls W.J., Brakensiek D.L. y Wight J.R. (1990). Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. *Water Resources Research* 26: 2401-2410.
- Yair, A. (1990). The role of topography and surface cover upon soil formation along hillslopes in arid climates. *Geomorphology*.