

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCURRIMIENTO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA DEL NORTE DE MÉXICO

Analysis of Factors Affecting the Rainfall - Runoff Relationship in a Semiarid Zone of Northern Mexico

Guillermo González-Cervantes^{1†}, Juan Estrada-Ávalos¹, José Luis González-Barrios¹,
José Antonio Cueto-Wong¹, Ignacio Sánchez-Cohen¹ y Gabino Castillo-Santillán²

RESUMEN

Con la finalidad de realizar un análisis de los factores que afectan el escurrimiento en una zona semiárida del norte de México, se establecieron seis sitios experimentales en dos vertientes de una cuenca de 160 ha. Cada vertiente, una ígnea y otra sedimentaria, contó con tres sitios seleccionados en un transecto representativo y contó con tres parcelas de escurrimiento de 1 m² por sitio. El estudio se llevó a cabo en una zona donde se ha realizado una explotación de ganadería extensiva durante los últimos 75 años. En cada una de las parcelas experimentales se realizaron simulaciones de lluvia con tres intensidades (30, 60 y 90 mm h⁻¹) y dos estados de humedad del suelo. En cada una de las pruebas de simulación se aplicó una lámina de 22 mm; se determinó el coeficiente de escurrimiento. Las variables observadas fueron: la pendiente del terreno, el porcentaje de cobertura vegetal, el contenido de materia orgánica, el grado de compactación del suelo, la textura y la relación entre limo y arcilla en el suelo. Mediante un análisis de componentes principales (ACP), se establecieron ciertas relaciones entre las variables observadas y su influencia sobre el escurrimiento. Los resultados muestran que el escurrimiento es condicionado esencialmente por la cobertura vegetal y la intensidad de la lluvia. Otros factores tuvieron menor relación con el escurrimiento, pero revelaron el estado en que se encuentra el suelo como recurso natural.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-CENID-RASPA. Apartado Postal 41, 35150 Cd. Lerdo, Durango, México.

[†] Autor responsable (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx)

² Unidad Laguna, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Apartado Postal 940, 27000 Torreón, Coahuila, México.

Recibido: marzo de 2005. Aceptado: abril de 2006.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 24: 337-345.

Palabras clave: simulación de lluvia.

SUMMARY

With the purpose of analyzing the factors limiting runoff in a semi-arid area of northern Mexico, six experimental sites were established in two flanks of a 160 ha watershed. Each flank, one eruptive and one sedimentary, had three selected sites organized in a representative transect, with three runoff plots of 1 m² each. The study was carried out in a 75-year-old cattle-breeding area. A rainfall simulation protocol was done in each plot with three intensities (30, 60, and 90 mm h⁻¹) and two soil moisture conditions. A 22 mm sheet of rainfall was applied in each experiment in order to determine the runoff coefficient. Other observed variables were slope, plant cover, organic matter content, soil compaction, texture, and the relationship between lime and clay in soil. The analysis of the main components (ACP) helps in establishing some relationships between observed variables and their influence on runoff. Runoff was conditioned essentially by plant cover and rainfall intensity. Other factors were less related to runoff, but they showed the condition of the soil as a natural resource.

Index words: rain simulation.

INTRODUCCIÓN

La explotación irracional de los recursos naturales, que a veces realiza el hombre, se refleja en la alteración de los fenómenos y procesos que ocurren en la naturaleza. En México, más de dos terceras partes del territorio están sujetas a una aridez climática; por ello, la comprensión de los procesos ambientales y edáficos puede ayudar a conocer la presión que ejercen los diferentes sistemas productivos. En las zonas áridas y semiáridas de México, la relación precipitación - escurrimiento es uno de

los indicadores que más es afectado por la presión de los diferentes sistemas de producción. Las sequías recurrentes (Nouvelot y Descroix, 1996; Descroix *et al.*, 1997), aunadas a la ganadería extensiva, principal actividad económica en estas zonas, provocan un fuerte sobrepastoreo en grandes extensiones de terreno (Anaya y Barral, 1995; Anaya, 1998). A su vez, este sobrepastoreo origina otro tipo de efectos en el suelo, como la erosión, la disminución en la capacidad de almacenamiento del agua y la baja fertilidad, que pueden llegar a degradarlo de manera irreversible.

Dada la fragilidad de los ecosistemas presentes en las zonas áridas y semiáridas, resalta la importancia de los estudios que consideran la relación entre la precipitación pluvial y el funcionamiento hídrico superficial; se liga este funcionamiento a las características intrínsecas del suelo y a sus estados de superficie.

En este sentido, un gran número de investigadores se ha abocado a la comprensión del funcionamiento hidrodinámico de los suelos a través del estudio de su comportamiento en superficie (procesos superficiales) y de su comportamiento interno (procesos subterráneos) (Ambroise, 1998). En el estudio de los procesos superficiales, la concepción más conocida es la propuesta por Horton (1933), en la que señaló que el escurrimiento se genera cuando la intensidad de la lluvia sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo. A este proceso, conocido como escurrimiento por excedencia de infiltración (*infiltration excess surface runoff*), se le asocian otros dos procesos: escurrimiento por saturación (*saturation excess surface runoff*), que da origen al escurrimiento una vez que se satura el suelo, y el escurrimiento originado por exfiltración (*return flow*), en manantiales, zonas hidromorfas, etc. Por otra parte, en el estudio de los procesos subterráneos, el escurrimiento hipodérmico (*interflow*) se ha investigado ampliamente, tanto en condiciones saturadas, como no saturadas (Ambroise, 1998); este escurrimiento se puede acelerar o amplificar según el tamaño de los macroporos que conforman la matriz del suelo (Germann, 1990). La principal diferencia entre ambos procesos, superficial y subterráneo, es la velocidad con la que se desplaza el agua, pudiéndose presentar, de manera simultánea o sucesiva, al combinarse una serie de condiciones y factores que son variables en espacio y en tiempo (Hursh y Brater, 1941). Otros investigadores han señalado la importancia que tienen los estados de superficie de los suelos en su capacidad de infiltración o escurrimiento

(Valentin, 1985; Casenave y Valentin, 1989; Boyer, 1999; Viramontes, 2000; Descroix *et al.*, 2002).

Durante los últimos 30 años, los trabajos de investigación se han orientado hacia el análisis de las interacciones entre los procesos de la hidrodinámica en el suelo y los factores que la condicionan (pedregosidad, vegetación, rugosidad, pendiente, tipo de suelo y carga animal). Estos trabajos, desarrollados en una amplia gama de condiciones climáticas y edáficas que van desde las zonas áridas hasta los climas templados, pueden ser diferenciados por el enfoque de su planteamiento (Collinet, 1988). Un primer enfoque experimental consiste en la instalación de parcelas que van desde un metro cuadrado hasta varias centenas de metros cuadrados, mediante las cuales es posible determinar ciertas interacciones entre los procesos y la intensidad de los factores que los condicionan. Un segundo enfoque, más extensivo, consiste en una visión a escala de grandes superficies (varias decenas de hectáreas o más) donde la variabilidad espacial y temporal de los factores toma una importancia mayor.

En la zona norte de México, los trabajos realizados han seguido ambos enfoques y se han desarrollado en diferentes ambientes climáticos: áridos con una precipitación media anual inferior a 200 mm (Delhoume, 1997), en ambientes semiáridos de 400 mm (Estrada, 1999; González, 2002) y en ambientes subhúmedos (600 mm) (Descroix y Poulenard, 1995; Descroix y Nouvelot, 1997; Buendía, 1998; Pérez, 1998; Viramontes *et al.*, 2004). En esos trabajos, los autores lograron establecer ciertas relaciones entre los procesos hidrológicos y los factores que los condicionan, tanto en las parcelas, como en la cuenca vertiente, resaltando el papel que juegan la vegetación y la lluvia.

El presente estudio forma parte de los trabajos que se han venido realizando en la zona semiárida del norte de México (parte media de la cuenca del río Nazas) y tiene el objetivo de analizar los factores que afectan la relación precipitación-escurrimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los trabajos de campo se realizaron dentro de las instalaciones de una propiedad privada dedicada a la explotación de ganadería extensiva. Con una superficie de 45 000 ha, el rancho se localiza en la cuenca del río Cuencamé, afluente derecho del río Nazas, entre 24° 33' y 24° 50' N y 103° 34' y 103° 50' O dentro del municipio de Cuencamé, Durango, México.

Desde el punto de vista geológico, la propiedad se sitúa en el contacto de los materiales eruptivos y sedimentarios que caracterizan a la cuenca del río Nazas en su orientación noroeste – sureste. Las rocas y los materiales eruptivos afloran esencialmente en su parte sur (2250 m de altitud), en forma de relieves riolíticos, de mesas basálticas o colinas dacíticas; en tanto que los materiales sedimentarios, situados sobre todo al norte de la cuenca (1850 m de altitud), se encuentran representados por materiales detríticos de tipo conglomerado y algunos afloramientos calcáreos. El clima semiárido se caracteriza por una precipitación media anual de 450 mm, con una estación de lluvias estival, de mayo a septiembre, cuando se precipitan entre 80 y 90% del total de la lluvia. Las lluvias invernales, de noviembre a enero, representan entre 10 y 15% de ese total.

Las parcelas experimentales de 1 m² se localizaron en seis sitios elegidos dentro de una cuenca vertiente, denominada Carboneras de 106 ha de extensión. La litología de esta cuenca se encuentra conformada en la línea de cresta de su vertiente derecha por un relieve de caliza del cretácico, con una costra de carbonato de calcio endurecido (caliche); su parte media se encuentra conformada por coluviones que se presentan también en la vertiente izquierda, en tanto que la parte baja se conforma de aluviones que dan origen al arroyo que conduce el agua de escurrimiento hasta el bordo de retención construido con fines de abrevadero. La vertiente izquierda de la cuenca, de origen ígneo, está conformada por rocas dioríticas del cuaternario.

Además de tomar en cuenta el aspecto litológico, para la selección de los sitios se consideraron el tipo y la profundidad del suelo, su ubicación en la vertiente (parte alta, media o baja) y el tipo de vegetación (Figura 1). Así, se seleccionaron tres sitios representativos para cada una de las dos vertientes, en los cuales se instalaron las parcelas experimentales de escurrimiento de 1 m², donde se llevaron a cabo varias simulaciones de lluvia.

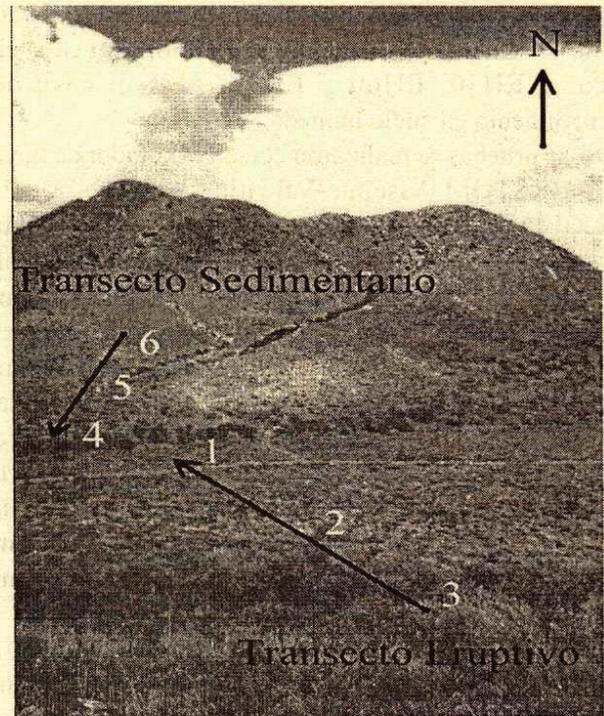


Figura 1. Cuenca vertiente Carboneras y ubicación de las parcelas experimentales.

En el Cuadro 1 se señalan las principales características de los sitios donde se ubicaron las parcelas experimentales.

En cada uno de los seis sitios representativos, se instalaron tres parcelas de 1 m², a las cuales se les aplicó lluvia simulada con intensidades de 30, 60 y 90 mm h⁻¹, y dos estados de humedad: suelo seco (estación de secas en los meses de abril y mayo) y suelo húmedo (20 min después de haber finalizado el escurrimiento de la primera simulación de lluvia). La duración de las pruebas se ajustó de tal forma que, en todos los casos, se aplicó una lámina de 22 mm de lluvia. Tanto las intensidades, como la lámina aplicada se definieron a partir del análisis de hietogramas característicos de la lluvia natural observados en el área de estudio (Estrada, 1999).

Cuadro 1. Principales características de los sitios seleccionados.

	Transecto eruptivo (TE)			Transecto sedimentario (TS)		
	parte alta	media	baja	alta	media	baja
Ubicación Sitio	3	2	1	6	5	4
Litología	Riolita	Costra de caliche y riolita	Aluviones	Costra de caliche	Encostramiento de caliche	Coluviones
Pendiente (%)	17	18	7	19	9	8
Profundidad del suelo (cm)	20	25	>200	15	140	150

Las láminas escurridas se identificaron como ES30, ES60 y ES90, para el caso del escurrimiento en suelo seco, y EH30, EH60 y EH90, para el caso del escurrimiento en suelo húmedo.

Las pruebas se realizaron con un simulador de lluvia tipo ORSTOM-Asseline-Valentin (Asseline, 1997), el cual utiliza un aspersor para aplicar el agua y un dispositivo electrónico que controla la intensidad de la lluvia. El simulador tiene un área de asperjado de 4 m², con un área útil de 1 m², correspondiente a la parcela experimental, la cual es delimitada con una estructura metálica que se introduce en el suelo a una profundidad promedio de 5 cm. Los escurrimientos se recolectan en la parte baja de la parcela a partir de un dispositivo de drenaje superficial colocado al ras del suelo, el cual conduce el agua hasta una cubeta graduada, de tal forma que el incremento de 1 cm en ella corresponde a 1 mm de lámina escurrida.

En la superficie de las parcelas de escurrimiento, se realizó una descripción de la cobertura vegetal mediante el método de los puntos cuadrantes; así, se determinó el porcentaje de suelo desnudo (SD) y de vegetación (VEG) en cada sitio. Se consideró el contenido de materia orgánica (MO), determinado con el método de Walkley y Black (1934), expresado en porcentaje, y el contenido de arena, limo y arcilla con el método de Bouyoucos, para determinar la relación entre limo y arcilla (REL), útil en los estudios de sensibilidad del suelo a la erosión y de micro-morfología superficial del suelo (Duclos, 1977; Cosandey y Robinson, 2000). Otra de las variables consideradas fue la pendiente de las parcelas (PEN), expresada en porcentaje. Finalmente, el grado de resistencia a la penetración se determinó, tanto en el suelo desnudo (COC), como en el suelo cubierto por vegetación (COP). Para determinar dicha resistencia se utilizó el penetrómetro Dickey-John con punta de 45°, el cual expresa la presión ejercida en kgf cm⁻². Las mediciones

se realizaron durante la estación seca, garantizando así el menor contenido de humedad posible en el suelo.

Con la finalidad de establecer las relaciones existentes entre el escurrimiento y los factores observados, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). El principio del ACP consiste en la transformación de un cierto número de variables cuantitativas en un nuevo número reducido de variables, no correlacionadas entre sí, llamadas componentes principales (Philippeau, 1986). El objetivo del ACP es determinar cuál de las variables observadas tiene mayor importancia estadística para explicar el fenómeno observado, en este caso el escurrimiento.

Dada la diferente naturaleza de cada una de las variables analizadas (coeficientes de escurrimiento, materia orgánica y compactación), se utilizó la matriz de correlación de los datos para realizar el ACP, dando así el mismo peso de importancia a cada una de las variables. Este análisis se realizó con el programa Statistica para Windows, Versión 4.2 (StatSoft, 1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los coeficientes de escurrimiento, expresados en porcentajes, para cada una de las parcelas (relación entre la lámina escurrida y la precipitada), se presentan en el Cuadro 2. Un primer análisis de estos resultados muestra que, en todos los casos, los coeficientes de escurrimiento se incrementaron durante la prueba realizada en condición de suelo húmedo en comparación con la de condición de suelo seco, presentándose el mayor incremento en el Sitio 5 con la intensidad de lluvia de 90 mm h⁻¹ (incremento de 36.02 a 70.26%). La humedad presente en el suelo será, pues, una condición importante para la generación del escurrimiento superficial en el área, sobre todo si se trata de lluvias con una intensidad igual a o menor que 60 mm h⁻¹. Esta importancia de

Cuadro 2. Coeficientes de escurrimiento en porcentaje observados en los sitios.

Sitio	Suelo en condiciones secas			Suelo en condiciones húmedas		
	30 mm h ⁻¹	60 mm h ⁻¹	90 mm h ⁻¹	30 mm h ⁻¹	60 mm h ⁻¹	90 mm h ⁻¹
1	0	5.05	9.30	10.86	25.24	28.45
2	1.66	9.10	29.83	12.97	32.07	54.51
3	3.58	21.74	31.44	8.93	44.38	53.53
4	12.43	28.16	27.62	30.25	47.89	50.49
5	0.23	34.72	36.02	5.44	57.29	70.26
6	0	0	28.15	2.83	11.39	53.60

la humedad, presente en el suelo, ha sido también mencionada por otros autores en diversas partes del mundo (Kohler y Linsley, 1951; Chevalier, 1983; Casenave y Valentin, 1989; Descroix *et al.*, 2002) y ha dado lugar a la formulación del índice de lluvias anteriores (o índice de Kohler) para poder modelar el escurrimiento superficial en el suelo.

Por otra parte, al comparar los coeficientes de escurrimiento de ambas vertientes, se aprecian tendencias en relación con la ubicación del sitio. Así, para el caso de la vertiente sedimentaria, en su parte baja y media donde la pendiente del terreno es menor (Sitios 4 y 5, respectivamente), los coeficientes de escurrimiento registrados son mayores que los de la parte alta (Sitio 6). Este resultado se mantiene tanto en condición de suelo seco, como húmedo, excepto cuando la intensidad de la lluvia es de 90 mm h⁻¹. Por el contrario, en la vertiente eruptiva, los coeficientes más importantes se presentan en la parte alta y disminuyen hacia la parte baja, conforme disminuye la pendiente del terreno. Esta tendencia en los coeficientes de escurrimiento también fue observada por Estrada (1999) en parcelas de escurrimiento de 60 m², instaladas en cuencas vecinas al área de estudio.

Con relación a las variables observadas, en el Cuadro 3 se presentan los valores correspondientes a cada uno de los sitios. Para el caso de la compactación del suelo, en ambas vertientes existe una marcada diferencia entre la compactación observada en suelo desnudo (COC) y la observada con cubierta vegetal (COP), siendo prácticamente en todos los casos de dos a seis veces mayor la primera en relación con la segunda.

La vegetación es importante, ya que constituye una barrera al paso del agua del escurrimiento y facilita, además, su infiltración y almacenaje en el suelo.

Por otra parte, los valores más elevados de la relación entre limo y arcilla, denominada REL (Cuadro 3), se presentan en la parte media y alta de la vertiente sedimentaria, en tanto que los valores más bajos se reportan en su parte baja, así como en la parte media y baja de la vertiente eruptiva.

Al realizar el análisis de componentes principales (ACP), se establecieron los coeficientes de correlación entre las variables señaladas y los ejes principales. En el Cuadro 4 se presentan los resultados de esos coeficientes y se aprecia que el primer eje representa 37.36% de

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de cada una de las variables en relación con los ejes principales del ACP.

Variable [†]	Eje 1	Eje 2	Eje 3
SD	0.246	0.916	0.173
VEG	0.686	-0.342	0.185
ES1	-0.871	-0.096	-0.300
ES2	-0.696	0.573	0.371
ES3	-0.157	0.909	-0.161
EH1	-0.837	-0.356	-0.091
EH2	-0.713	0.500	0.438
EH3	-0.051	0.935	0.056
PEN	0.475	0.347	-0.651
COC	-0.768	-0.025	-0.549
COP	-0.776	0.154	-0.181
MO	0.275	0.330	-0.729
REL	0.594	0.704	-0.018
Expl. variable	4.857	4.121	1.810
Prop. total (%)	37.36	31.70	13.92

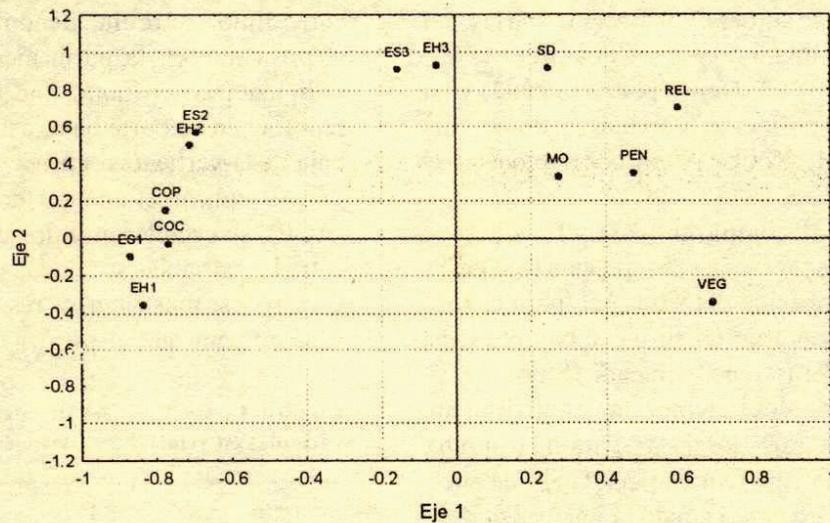
[†] SD = suelo desnudo; VEG = vegetación; ES1, ES2 y ES3 = coeficiente de escurrimiento en suelo seco para las intensidades de 30, 60 y 90 mm h⁻¹, respectivamente; EH1, EH2 y EH3 = coeficiente de escurrimiento en suelo húmedo para las intensidades de 30, 60 y 90 mm h⁻¹, respectivamente; PEN = pendiente; COC = compactación en suelo desnudo; COP = compactación del suelo con vegetación; MO = materia orgánica; REL = relación limo-arcilla.

Cuadro 3. Variables observadas en cada uno de los sitios.

Sitio	SD [†]	VEG	PEN	COC	COP	MO	REL
		%		kgf cm ⁻²		%	Adim.
1	4.26	20.19	6.7	11.9	3.8	2.5	1.14
2	6.41	12.37	16.6	13.4	2.0	2.5	1.11
3	8.19	7.63	15.8	19.1	6.0	3.8	2.06
4	5.89	12.57	7.4	18.5	7.0	3.5	0.62
5	12.59	15.35	9.3	10.5	4.5	3.0	2.70
6	9.35	21.76	17.7	11.5	3.4	5.1	2.73

[†] SD = suelo desnudo; VEG = vegetación; PEN = pendiente; COC = compactación en suelo desnudo; COP = compactación en suelo con vegetación; MO = materia orgánica; REL = relación limo-arcilla.

a)



b)

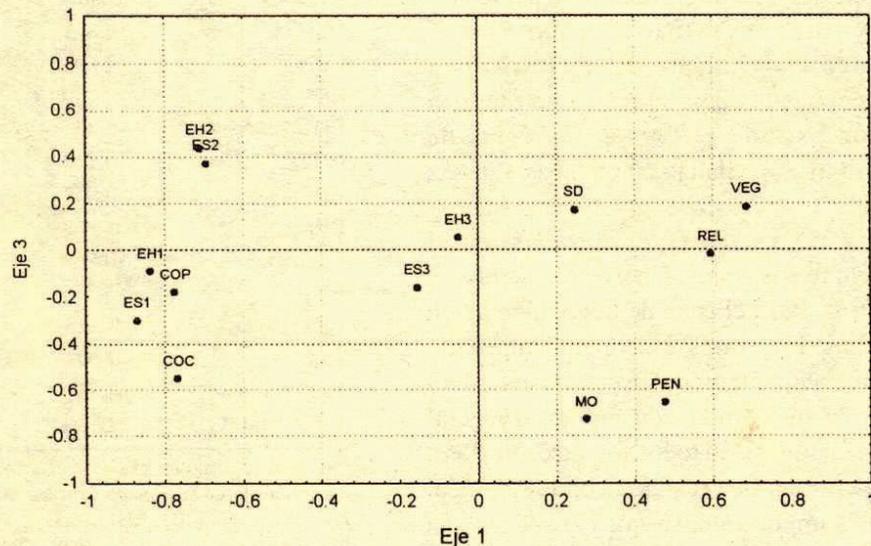


Figura 2. Representación gráfica de los Ejes 1 y 2 (a) y 1 y 3 (b) del análisis de componentes principales(ACP).

la variabilidad total del conjunto de puntos, en tanto que el Eje 2 representa 31.70% y el Eje 3, 13.92%.

El análisis detallado del Cuadro 4 y sus representaciones gráficas (Figuras 2a y b) permiten caracterizar los tres ejes del ACP, de la forma siguiente:

- El Eje 1 caracteriza la importancia del escurrimiento provocado por intensidades bajas y medias de lluvia (ES1, ES2, EH1 y EH2), asociadas a la compactación del suelo (COC y COP) y contrapuestas a la vegetación (VEG).

- El Eje 2 caracteriza el escurrimiento de las lluvias de intensidad alta (ES3 y EH3), asociadas al suelo desnudo (SD) y, en menor grado, a la relación limo arcilla (REL).

- El Eje 3 caracteriza el contenido de materia orgánica (MO) asociada, en menor grado, a la pendiente (PEN).

Así, el primer eje define, *a priori*, las variables que pueden favorecer el escurrimiento con lluvias de intensidades bajas (30 mm h^{-1}) y medias (60 mm h^{-1}). En este eje, la compactación observada, tanto en suelo desnudo, como en suelo con vegetación, se encuentra asociada a un escurrimiento provocado por intensidades

de lluvia de 30 y 60 mm h⁻¹. Esta asociación se presenta en ambas condiciones: suelo seco y húmedo. Por el contrario, la variable vegetación (VEG), localizada al extremo derecho del Eje 1, condiciona el escurrimiento para ambos casos. Es decir, que para intensidades de 30 y 60 mm h⁻¹, ya sea en condiciones húmedas o secas, los escurrimientos son favorecidos por la compactación del suelo, en tanto que la presencia de vegetación limita los escurrimientos.

El segundo eje tiene mayor relevancia para explicar el funcionamiento hidrodinámico en los suelos. En este eje puede observarse que el suelo desnudo (SD) cobra importancia en función de la intensidad de las lluvias, al desplazarse en el mismo sentido que las intensidades de lluvia de 90 mm h⁻¹. Es decir, a mayor intensidad de lluvia, las áreas del suelo desnudo favorecen el incremento del escurrimiento. Este comportamiento se presenta tanto en condiciones de suelo seco, como en condiciones húmedas, ya que, como se explicó para el factor de compactación (COC y COP), en ausencia de vegetación, el suelo desnudo y degradado ofrecerá poca resistencia al escurrimiento superficial.

Además, se observa cómo la relación limo-arcilla (REL) se asocia al escurrimiento, en tanto la intensidad de la lluvia se incrementa. Esta tendencia puede explicarse por el efecto que tiene la organización pelicular del suelo cuando la relación limo:arcilla es alta (Gascuel-Odoux *et al.*, 1991). Si no existe una cobertura vegetal que permita interceptar la energía cinética de las gotas de lluvia, el impacto sobre el suelo provocará rompimiento de agregados y la redistribución de partículas en la superficie (Poulenard *et al.*, 2004). Esto da lugar a que ocurra el sellado progresivo de los poros y, por lo tanto, la impermeabilización de la superficie del suelo, dando así origen a la formación de costras por el efecto *splash* (Boiffin, 1984; Cosandey y Robinson, 2000). Esta ausencia de protección vegetal puede ser debido a las condiciones climáticas, o bien, en la mayoría de los casos, a la destrucción de la vegetación por actividades productivas (sobre pastoreo ganadero, áreas abiertas al cultivo, prácticas de quema de pastizales...).

Por último, el tercer eje del ACP representa el contenido de materia orgánica de los suelos (MO), que no tiene relación aparente con la aptitud de los suelos al escurrimiento, al igual que la pendiente (PEN). Sin embargo, ambas variables siguen la misma tendencia, es decir, a mayor pendiente, mayor contenido de materia orgánica en el suelo. ¿Es este resultado un indicativo de

mayor erosión en la parte media y baja de las vertientes?, y ¿de un impacto de la presión productiva ganadera?

CONCLUSIONES

- Este trabajo permite analizar los factores que afectan la relación precipitación-escurrimiento e inducir la presión que ejerce el sistema productivo de ganadería extensiva sobre las características del recurso suelo.
- De los factores analizados, la intensidad de la lluvia resalta por su importancia en la generación de escurrimiento.
- Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) establecen que el escurrimiento también es condicionado por la cobertura vegetal y la compactación del suelo. La influencia de la cobertura vegetal es mayor cuando se presentan bajas intensidades de lluvia (30 mm h⁻¹), ya sea en suelo seco o húmedo, y disminuye a medida que se incrementa la intensidad de la lluvia (60 y 90 mm h⁻¹). En contraparte, la compactación del suelo favorece el escurrimiento aun con bajas intensidades de lluvia (30 mm h⁻¹). El suelo desnudo y la relación limo-arcilla cobran importancia para el escurrimiento al incrementarse la intensidad de la lluvia.
- Es evidente que las actividades productivas modifican los procesos que se dan en la naturaleza. En la zona de estudio, los factores que más influyen la relación precipitación-escurrimiento son aquéllos relacionados con la degradación de la cobertura vegetal y de los suelos. La ausencia de vegetación y la compactación del suelo por pisoteo del ganado, combinadas con los factores naturales (sustrato sedimentario o eruptivo, riqueza de limo en el suelo, lluvias estivales de alta intensidad), provocan mayor escurrimiento que erosiona los suelos con mayor facilidad aguas abajo.
- Todas las actividades que se realizan en estas zonas deberán tender a la conservación del suelo y su cubierta vegetal, a través de prácticas de manejo sustentable.

LITERATURA CITADA

- Ambroise, B. 1998. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1 - Processus et facteurs. Rev. Sci. Eau. 11: 471-495.
- Anaya, E. 1998. Caracterización y evaluación de la cobertura vegetal en la cuenca del arroyo Ocueta (Durango Norte de México) Folleto Científico 7. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México.

- Anaya, E. y H. Barral. 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semiárida de México. Folleto Científico 5. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México.
- Asseline, J. 1997. Le simulateur de pluie en 1997 (type ORSTOM, Asseline-Valentin): adaptations aux zones semi-arides et de montagne. pp. 272-281. *In*: G. de Noni, J-M. Lamachère y E. Roose (eds.). Erosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes. Bulletin - Réseau Erosion (FRA) 17. Institut de Recherche pour le Développement. Montpellier, France.
- Boiffin, J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Institut National Agronomique Paris-Grignon. Paris, France.
- Boyer, Ch. 1999. Variabilité spatiales du comportement hydrodynamique de la sierra madre occidentale (Mexique). Université Joseph Fourier-Institut de Géographie Alpine. Grenoble, France.
- Buendía, A. 1998. Análisis hidrológico en parcelas experimentales de la subcuenca Sardinias de la región hidrológica 36. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México.
- Casenave, A. y Ch. Valentin. 1989. Les états de surface de la zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration. Collection didactiques. ORSTOM. Paris, France.
- Chevalier, P. 1983. L'indice des précipitations antérieures. Cahiers ORSTOM. Ser. Hydrol. XX: 3-4: 179-189
- Collinet, J. 1988. Étude expérimentale de l'érosion hydrique de sols représentatifs de l'Afrique de l'Ouest (1). 1. Présentation des sites expérimentaux. Méthode et identification des processus élémentaires. Analyse et comparaison des régimes de ruissellement. Cahiers ORSTOM. Ser. Pédologie XXIV:3: 235-254.
- Cosandey, C. y M. Robinson. 2000. Hydrologie continentale. Armand Colin. HER, Paris, France.
- Delhoume, J. P. 1997. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride. Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. TDM. ORSTOM Editions. Paris, France.
- Descroix, L. y J. F. Nouvelot. 1997. Eскурimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental. Folleto Científico 7. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria-Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ORSTOM. Gómez Palacio Durango, México.
- Descroix, L. y J. Poulénard. 1995. Les formes d'érosion dans la Sierra Madre Occidentale (Nord Ouest du Mexique): vers une cartographie de l'érosion. Bull. Labo. Rhô. Geom. 33 et 34. Lyon, France.
- Descroix L., J. F. Nouvelot y J. Estrada. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. Folleto Científico 10. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria-Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ORSTOM. Gómez Palacio Durango, México.
- Descroix, L., J. L. González Barrios, J. P. Vandervaere, D. Viramontes, A. Bollery. 2002. An experimental analysis of hydrodynamic behaviour on soils and hill-slopes in a subtropical mountainous environment (Western sierra madre, Mexico). *J. Hydrol.* 266: 1-14.
- Duclos, G. 1997. Les analyses de sol et leur interprétation en vue du conseil en fertilisation. Eau et aménagement de la région provençale 15. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Estrada, A. J. 1999. Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique. Université de Montpellier II. Montpellier, France.
- Gascuel-Odoux, C., P. Bruneau y P. Curmi. 1991. Runoff generation: assessment of relevant factors by means of soil microtopography and micromorphology analysis. *Catena* 4: 209-219.
- Germann, P. F. 1990. Macropores and erosion. pp. 173-214. *In*: M. G. Anderson y T. P. Brut (eds.). Process studies in hill-slope hydrology. John Wiley. Chichester, UK.
- González, C. G. 2002. Fonctionnement hydrodynamique des sols de versant en amont de petits barrages en région semi-aride du Nord Mexique (Ranch Atotonilco). Université d'Angers. Angers, France.
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Amer. Geophys. Union* 14: 446-460.
- Hursh, C. R. y E. F. Brater. 1941. Separating storm hydrographs from small drainage areas into surface and subsurface flow. *Trans. Amer. Geophys. Union* 22: 863-870.
- Kohler, M. A. y R. K. Linsley. 1951. Predicting the runoff from storm rainfall. Research Paper 34. Weather Bureau, US Department of Commerce. Washington, DC, USA.
- Nouvelot, J. F. y L. Descroix. 1996. Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. *Trace (Revista del Centro Francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, México)* 30:9-25.
- Pérez, C. 1998. Evaluación del escurimiento y la erosión hídrica en la subcuenca Cañón de Fernández de la región hidrológica 36. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-ORSTOM. Gómez Palacio Durango, México.
- Philippeau, G. 1986. Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales. Institut Technique des Céréales et des Fourrages. Service des Études Statistiques. Paris, France.
- Poulénard, J., J. L. González Barrios, D. Viramontes, L. Descroix y J. L. Janeau. 2004. Un encostramiento de los suelos que limita la infiltración. pp. 145-160. *In*: L. Descroix, J. L. González Barrios y J. Estrada Avalos (eds.). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Institut de Recherche pour le Développement. Gómez Palacio, Durango, Mexico.
- StatSoft. 1993. Statistica para Windows. Versión 4.2. Tulsa, OK, USA.
- Valentin, C. 1985. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques, collection "ET". ORSTOM. Paris, Francia.
- Viramontes, P. D. 1997. Utilisation de l'eau en milieu rural du Centre-Nord aride du Mexique. Université de Bordeaux. Bordeaux, France.

- Viramontes, P. D. 2000. Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidental, Mexique) causes et conséquences de son évolution. Université Joseph Fourier-Grenoble I. Grenoble, Francia.
- Viramontes, P. D., E. Anaya, C. García, J. Poulénard, H. Barral, L. Macías, M. G. Rodríguez. 2004. Demasiado ganado y demasiados leñadores: una economía minera. pp. 183-194. *In:* L. Descroix, J. L. González Barrios y J. Estrada Avalos. (eds.). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Institut de Recherche pour le Développement. Gómez Palacio, Durango, México.
- Walkley, A. y C. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.