HAL
open science

Condiciones que favorecen la erosion y el escurrimiento en manto

Luc Descroix, D. Viramontes, E. Anaya, Henri Barral, Alain Plenecassagne, Jose Luis Gonzalez Barrios, J. Bacon, L. Macias

To cite this version:

Luc Descroix, D. Viramontes, E. Anaya, Henri Barral, Alain Plenecassagne, et al.. Condiciones que favorecen la erosion y el escurrimiento en manto. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada, 2004. ird-02157866

HAL Id: ird-02157866

https://ird.hal.science/ird-02157866

Submitted on 17 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Capítulo 7

Condiciones que favorecen la erosión y el escurrimiento en manto

José Luis González Barrios, Luc Descroix, David Viramontes, Jérôme Poulenard, Alain Plenecassagne, Laura Macias, Christelle Boyer, Arnaud Bollery, Rodolfo Jasso Ibarra

Se realizaron mediciones bajo condiciones de lluvia natural en la red de parcelas y cuencas vertientes equipadas de la Sierra Madre Occidental (180 eventos de lluvia de 1994 a 1998). Esto permitió prescindir del uso de un simulador de lluvias además de contar con una de base de datos en condiciones reales. Las parcelas de medición, por el contrario, llevan implícita un "ruido de fondo" ya que su instalación perturba las condiciones de escurrimiento e infiltración natural. En la medida de lo posible, se instalaron estas parcelas en función de la topografía, procurando no alterar los estados de superficie existentes. Sin embargo, es claro que los únicos datos sin ese "ruido de fondo" son los observados a la salida de las cuencas vertientes.

Para las cuencas de varios miles de km^2, es difícil dar una idea de las formas del escurrimiento y de los límites de su desencadenamiento en el campo a partir de los gastos observados en la salida. Sin embargo, es la única fuente de información que se dispone para períodos largos en los estudios hidrológicos en el norte de México. Ejemplo de ello son: la estación El Palmito puesta en servicio en 1929 en el sitio donde más tarde se instalaría la presa del mismo nombre (inaugurada en 1946); las estaciones Sardinas (en el río Sextín) y Salomé Acosta (en el río Ramos) puestas en servicio en 1970 para cuantificar los dos grandes afluentes del río Nazas y que funcionaron correctamente excepto en la gran crecida de 1991-1992.

Estados de superficie y comportamiento hidrodinámico de las vertientes

¿Comportamiento hortoniano[1]?

Se toman como ejemplo los histogramas de la estación El Cura para los años 1995 y 1996 (Figura 7.1), la cuenca vertiente tiene una superficie de 21.8 km^2, desarrollada sobre riolitas, con una cobertura vegetal de 43 por ciento y con pendientes poco escarpadas (en promedio 6.6º).

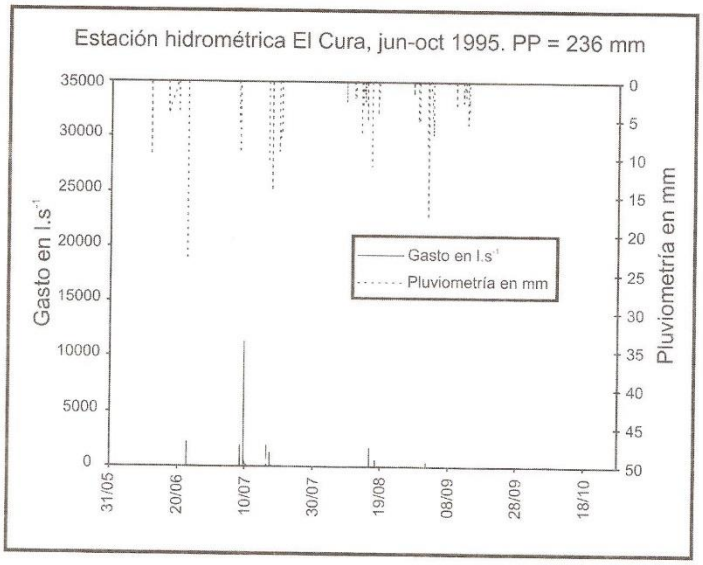
La precipitación y los gastos del año 1995, representativos de los años observados (1994 a 1999), muestran un retorno rápido a 0 en los escurrimientos después de las precipitaciones, característico del escurrimiento hortoniano debido a que la intensidad de la lluvia sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo (Horton, 1933). Si se refiere al año 1996, único que no es representativo de los años observados, se aprecia que hasta el 18 de agosto el comportamiento de los escurrimientos es conforme al de 1995. Posteriormente se tiene la aparición de un escurrimiento de base en el arroyo, de algunas centenas de litros por segundo, y esto durante tres semanas, por el hecho de una pluviosidad importante.

La aparición del flujo base fue observado posteriormente en solo dos ocasiones: en 1997 durante algunos días al final de la temporada, originado por una abundante precipitación, y del 15 al 20 de junio de 1998, es decir antes de la llegada de las lluvias del monzón[2], originado por los remanentes de un huracán (60 mm en 4 días) (Boyer, 1999).

Sequía de los años observados

Pero la observación de series de precipitaciones observadas en la Sierra (Figura 7.1) muestra que los años 1994 a 1999 fueron secos y que inversamente, 1996 por el contrario entra en el promedio de precipitación del periodo 1970-2000. Se puede deducir que el año 1996, poco representativo del periodo de observación, es de hecho representativo de la serie "larga" ¿Es decir de una situación "normal" o "promedio"?

[1] *Ver glosario*
[2] *Ver glosario*



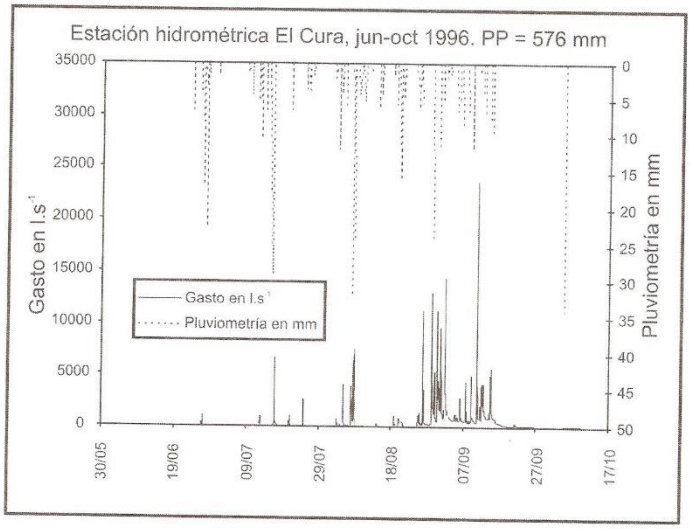


Figura 7.1. Comparación de los hidrogramas de la estación del arroyo el cura para 1995 y 1996.

A priori si, pero la falta de observaciones a la escala de la parcela o del una pequeña cuenca experimental nos obliga a tomar como referencia las cuencas grandes de los ríos Ramos y Sextín en los que se confirma que 1996 esta más cerca de los años anteriores a 1993 y que es posiblemente el único año representativo de los años de mediciones (Viramontes, 2000).

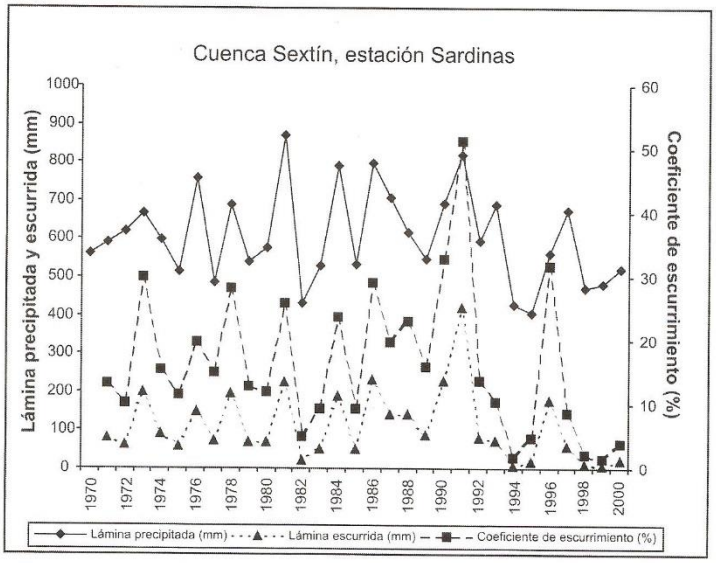
Esto fue confirmado por un testimonio oral (sujeto a la subjetividad) de los habitantes de los pueblos de la Sierra, que afirmaban al ver un escurrimiento semi perenne reestablecido en los arroyos después del 20 de agosto de 1996, que en efecto esa era la situación normal, al menos a la que ellos estaban acostumbrados a ver (Inard-Lombard, 2000).

El comportamiento hortoniano de los escurrimientos medidos, ¿Es debido a la degradación de los suelos o a medidas efectuadas durante los años secos?

En la Figura 7.2 se aprecia la respuesta hidrológica de las cuencas a la precipitación y a la sucesión de años secos que prevaleció durante el período de observaciones.

Antes que nada, se aprecia que el déficit de precipitación, a la escala de las grandes cuencas (4,660 km^2 del río Sextín y 7,130 km^2 del río Ramos), es menor que en las cuencas experimentales (déficit de 20-25 por ciento en lugar de 30-35 por ciento en la Ciénega de Escobar, ver Cuadro 7.1). A pesar de ello, después de 1993, los coeficientes de escurrimiento y las láminas escurridas disminuyeron sensiblemente en cada una de las cuencas (excepto en 1996). Los escasos escurrimientos observados a partir 1994 se asemejan a los registrados en la cuenca El Cura en 1995, al igual que en 1994, 1997, 1998 y 1999 (Figura 7.1).

Por el contrario, en la Figura 7.2 se aprecia que el año de 1996 se asemeja más a los años anteriores a 1991, tanto en su precipitación como en sus escurrimientos. El año de 1997 tuvo un comportamiento particular, con una precipitación elevada y poco escurrimiento. Este año es un año caliente en términos de El Niño (*El Niño Southern Oscillation,* ENSO; Rossel, 1997), lo que provocó abundantes precipitaciones en invierno, aunque no llegaron a tener el volumen del invierno 1991-1992 ni su efecto en términos de escurrimiento. En este sentido, las lluvias de diciembre 1991 y enero 1992 llenaron la presa El Palmito, incluso llegando a provocar inundaciones en Comarca Lagunera, situada 150 km aguas abajo.



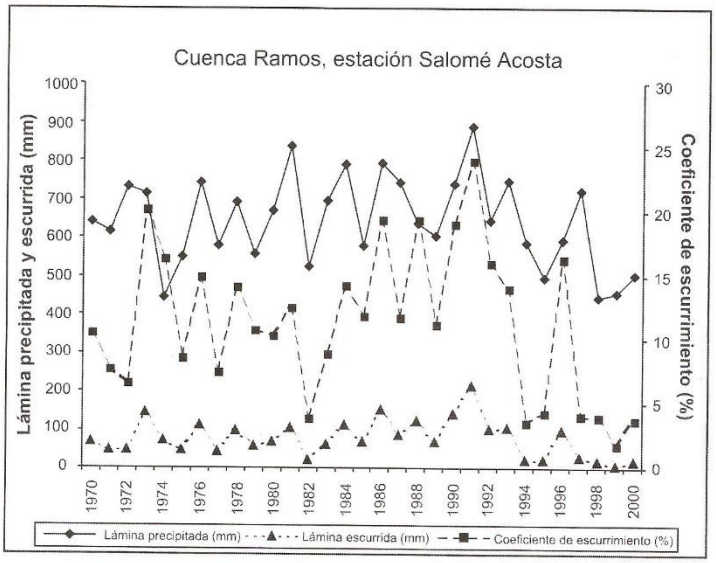


Figura 7.2. Precipitación, gastos observados y coeficiente de escurrimiento para las cuencas del río Sextín y del río Ramos de 1970 a 2000.

Al analizar los registros de los períodos más largos de lluvia en las grandes cuencas, y los seis años de mediciones en las cuencas experimentales más pequeñas, se puede observar que el escurrimiento en los pastizales de la Sierra Madre Occidental es mixto. Éste presenta un funcionamiento principalmente hortoniano durante los años secos y durante las primeras semanas de las épocas de lluvias; y un escurrimiento cappusiano[3] (Cappus, 1960) ante la ocurrencia de huracanes, al igual que en los inviernos de los años "calientes" (es decir con El Niño) y en años de precipitación normal, a partir de una precipitación acumulada de 200 mm en un mes de la estación de lluvias.

Cuadro 7.1. Precipitación anual en los sitios de medición, de 1994 a 1999 (años de observación hidrológica).

Sitio experimental	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Rosilla				345	360	612	339	365		
Aguaje				295	324	690	298	320		
Manga				234	284	602	322	272		
Cuenca experimental										
Manga				245	321	578	281	260	300	
Cura				295	330	643	290	360	340	
Esmeralda				315	340	652	310	390	380	
Pilitas				312	310	620	315	280	310	
Estación de Ciénega de Escobar*	**428**	**432**	**512**	**370**	**490**	**694**	**460**	**410**	**365**	**445**

** Se trata de la estación más cercana de la red nacional de medición de CNA. Esta situada a 10 km al oeste del centro del dispositivo experimental; su precipitación anual promedio (1965-1998) es de 584 mm (desviación estándar = 141 mm).*

Para resumir a la vez espacialmente y temporalmente esta variación de facies hidrológica, se puede estimar que existe un umbral de 500 mm de precipitación anual abajo del cual todo escurrimiento es hortoniano, y arriba del cual aparece un escurrimiento cappusiano. Se puede estimar que este aparece cuando se han producido 200 mm de precipitación en algunas semanas, llenando con ello, en una gran parte del espacio, la capacidad de absorción de agua de los suelos.

[3] *Ver glosario*

Esta capacidad ha sido calculada (Descroix *et al.*, 2002): en 32 mm en promedio para los Cambisoles de un espesor de hasta 20 cm, y de 135 mm cuando tienen de 20 a 60 cm de profundidad; esas dos categorías representan 94 por ciento del espacio en los pastizales y bosques de la Sierra Madre Occidental (Viramontes, 1995; Barral y Anaya, 1995). La poca profundidad de esos suelos y la impermeabilidad total de las ignimbritas rioliticas subyacentes, explican el rápido paso a un funcionamiento en zonas saturadas contributivas, las cuales solo se pudieron observar durante 1996, debido a la escasa precipitación durante el periodo de observaciones.

Conclusión: el efecto de la duración del evento cuando el reservorio es pequeño

Las lluvias de invierno y las lluvias de los remanentes de huracanes muestran un funcionamiento interesante: escurren, al cabo de algunas horas o días, a pesar de tener valores de intensidad más bajos (0.5 a 2 mm h^{-1}) que las conductividades hidráulicas[4] observadas en el campo. Estas últimas, a pesar de presentar una fuerte variabilidad espacial (Descroix *et al.*, 2002) tienen valores promedio de:

- 11 mm h^{-1} en las superficies de tipo "INT"

- 14.5 mm h^{-1} en las superficies de tipo "GC"

- 29 mm h^{-1} en las superficies de tipo "FPB"

Ahora bien, si las lluvias son poco intensas y con una duración de varios días continuos (característica de las lluvias de invierno y de los huracanes), éstas llegan a saturar el reservorio del suelo incluso si éste se encuentra vacío al principio de las precipitaciones, teniendo a su favor que estas lluvias se producen generalmente en un momento en que la evapotranspiración es baja (caso de las lluvias de invierno). Así, el suelo puede saturarse en dos días con una precipitación de 1 mm h^{-1} (Viramontes *et al.*, 2002), lo que pude provocar que el reservorio "desborde" y que las vertientes funcionen como superficies saturadas contributivas (Imbeaux, 1892); aunque requieran 20 mm de lluvia al principio de la temporada y de 5 a 15 mm al final de la estación para que un evento de lluvia de una hora de duración provoque escurrimiento. Este efecto de la duración fue observado en el sitio semiárido de Atotonilco (Estrada, 1999).

[4] *Ver glosario*

Consecuencias en las propiedades físicas de los horizontes superficiales de los suelos: ¿Porqué no hay cárcavas?

Las mediciones de las propiedades físicas de los suelos fueron realizadas de 1997 a 2001 en las cuencas de la Sierra. En 1997 se realizaron las mediciones de infiltrometría con cilindro único (método de Roose *et al,* 1993) y de densidad aparente (método del cilindro). Se tomaron muestras de suelo en cada sitio para determinar la granulometría[5] (en el laboratorio del CENID RASPA en Gómez Palacio) así como para determinar los parámetros siguientes:

- capacidad de campo[6]

- punto de marchitamiento permanente[7]

- contenido de carbono total[8]

- porosidad[9]

En 1998, el trabajo de medición en el campo se llevó a cabo en los mismos sitios pero con el método de inflitrometría TRIMS (Vauclin y Chopart, 1992). En cada sitio se realizaron: una prueba en modo multipotencial (haciendo variar la depresión aplicada al infiltrómetro) y tres pruebas simples (con una depresión única de 10 mm) realizadas, una con disco grande (25 cm de diámetro) y las otras dos con disco pequeño (8 cm) para tener datos en modo multi-radial (Vandervaere, 1995). El hecho de tomar el promedio de las medidas realizadas con los discos pequeños para el cálculo de la conductividad hidráulica (K), limita el efecto de la variabilidad espacial de sus valores. Se utilizó en cada sitio la plataforma de un disco grande para efectuar el muestreo de densidad aparente con el método "de la alberca", el cual resultó más robusto que el método de densidad aparente con el cilindro.

Con el fin de determinar la relación entre variables y su relación con la conductividad hidráulica, se realizó un análisis en componentes principales (ACP).

[5] *Ver textura en glosario*
[6] *Ver glosario*
[7] *Ver glosario*
[8] *Ver glosario*
[9] *Ver glosario*

Los resultados se exponen en la Figura 7.3; el número de variables del espacio de las dos primeras componente se explica en el Cuadro 7.2.

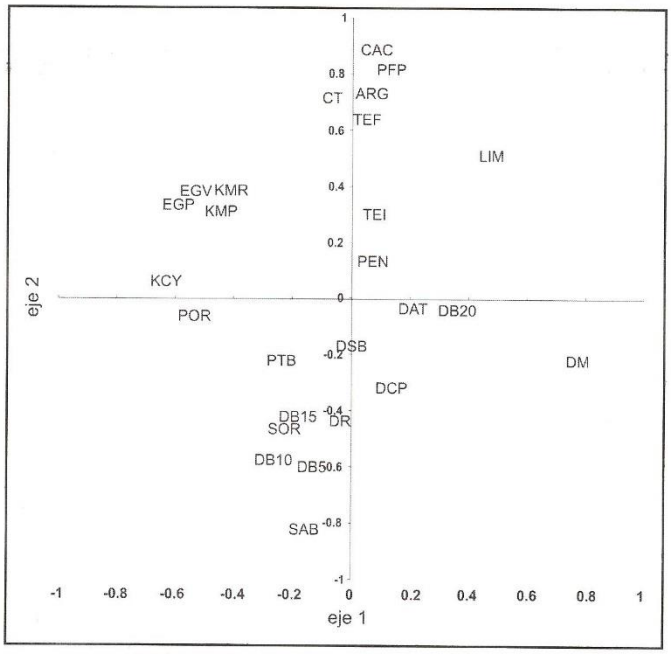


Figura 7.3. Espacio de las variables del ACP parámetros del suelo (tomado de Descroix *et al.*, 2002).

El espacio de las variables permite poner en evidencia los siguientes puntos (Descroix *et al.*, 2002):

- Existe una correlación evidente entre los valores de conductividad hidráulica (KMR y KMP en particular) y el contenido en elementos gruesos (EGP y EGV), esto de acuerdo a lo constado en escurrimiento y erosión;

- La pendiente (PEN) la densidad aparente total (DAT, matriz del suelo más elementos gruesos) y el diámetro del bulbo de humectación (DSB) no tienen relación notoria con la conductividad hidráulica

Cuadro 7.2. Parámetros físicos del suelo tomados en cuenta en el ACP.

Conductividad hidráulica	KMR	K medida con TRIMS en modo multi-radial
	KMP	K medida con TRIMS en modo multi-potencial
	KCY	K medida con el método Beerkan
Densidad aparente	DAT	densidad aparente del suelo completo (matriz, piedras y guijarros)
	DCP	densidad de piedras y guijarros
	DM	densidad de la matriz
	DR	densidad real
Porosidad	POR	porosidad
Pendiente	PEN	valor de la pendiente
Dimensión del bulbo de humedecimiento de las pruebas de cilindro	PTB	profundidad total del bulbo
	DSB	diámetro superficial del bulbo
	DB5	diámetro del bulbo a 5 cm de profundidad
	DB10	diámetro del bulbo a 10 cm de profundidad
	DB15	diámetro del bulbo a 15 cm de profundidad
	DB20	diámetro del bulbo a 20 cm de profundidad
Textura	ARG	% de arcilla
	LIM	% de limo
	SAB	% de arena
Elementos gruesos	EGV	% de elementos gruesos (en volumen)% de
	EGP	elementos gruesos (en peso)
Sortividad	SOR	sortividad
Contenido en agua	TEI	contenido inicial de agua
	TEF	contenido final de agua
Propiedades del suelo	CAC	capacidad de campopunto de marchitamiento
	PFP	permanente
	CT	carbón total

Esos parámetros físicos explican las fuertes variaciones de conductividad hidráulica entre los diferentes estados de superficie (Descroix *et al.*, 2001). El punto más importante parece ser el papel de la pedregosidad (Poesen, 1990) y en particular el papel de las piedras grandes libres en los terrenos con pendiente.

- El primer eje explica 24 por ciento de la varianza y es determinado también por la porosidad (POR) que se correlaciona positivamente a la conductividad, y la densidad

de la matriz del suelo (DM) que se correlaciona negativamente con K.

- El segundo eje (que explica 16 por ciento de la varianza), es caracterizado por el contenido en arcilla (ARG), la capacidad de campo (CAC), el punto de marchitamiento permanente (PFP), el contenido de carbono total (CT), y el contenido en agua a saturación (TEF), todas estas variables se correlacionan positivamente con K; por el contrario, la densidad real (DR) se correlaciona de manera negativa.

Se utilizaron esos parámetros para determinar, en el paisaje donde domina fuertemente la erosión aerolar (o laminar), los parámetros que originan las cárcavas (De Ploey, 1991). Varios de estos son muy difíciles de cuantificar salvo introduciendo una desviación en el tratamiento estadístico de los datos. Se procedió entonces a un análisis factorial de correspondencias (AFC) para encontrar las relaciones entre variables estudiadas.

Así, se tomaron en cuenta:

- los elementos vegetales (en porcentaje de cobertura): mantillo (LIT), árboles (ARB), gramíneas (GRM), plantas anuales (ANN);

- los elementos litológicos: afloramientos de ignimbritas (IGN);

- los elementos edafológicos: proporción de arena (SAB), estados de superficie (GC) pedregosidad (PIE) gravas (GRV), encostramientos (CRO);

- los elementos topográficos: pendiente (PEN), rugosidad (RUG) presencia de terracitas (TER), distancia de la cárcava al dren principal (DRR), pendiente de esta distancia (PRR);

- los elementos descriptivos de las cárcavas: cuenca vertiente que la alimenta (SRF), longitud (LON) y volumen de la cárcava (VOL).

La Figura 7.4 representa el espacio de las variables de este análisis según los dos componentes principales. Estos dos ejes representan respectivamente el 34 y el 17 por ciento de la varianza explicada. Este análisis permite subrayar las relaciones siguientes:

- el tamaño de las cárcavas (longitud y volumen) se correlaciona positivamente con el tamaño de su cuenca vertiente, ciertamente, pero sobretodo: con el encostramiento de los suelos de la cuenca, la presencia de ignimbritas y de gramíneas;

- el tamaño de las cárcavas se relaciona negativamente a la pendiente y a la rugosidad así como a todos los elementos que componen esa rugosidad: terracitas, pedregosidad,

presencia de gravas.

Este análisis fue realizado a partir de una muestra de 31 cárcavas repartidas en 400 km^2.

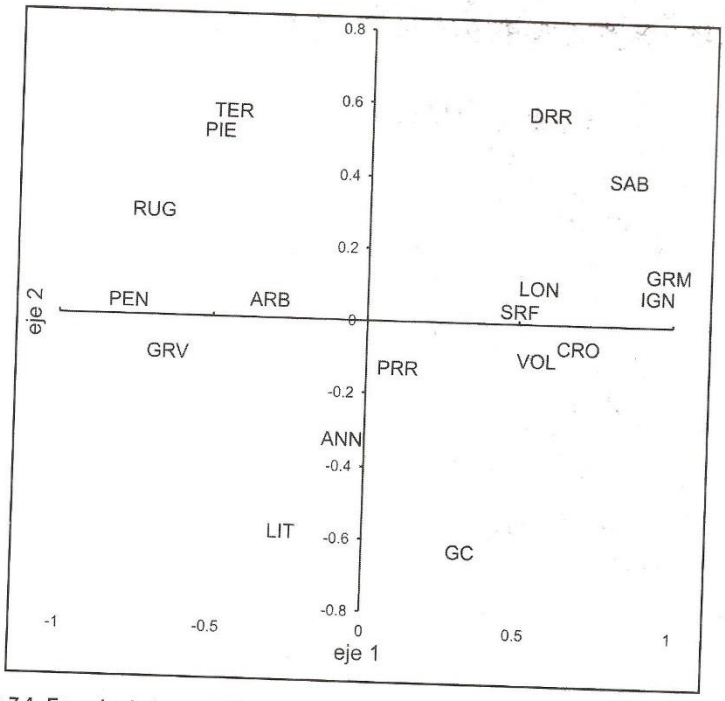


Figura 7.4. Espacio de las variables del AFC en las cárcavas (tomado de trabajos en curso).

Esto confirma la oposición ya encontrada en términos de los estados de superficie, entre:

- los sectores de pendiente suave y vertientes largas, encostradas y pastoreadas que presentan una fuerte incidencia de cárcavas, si los suelos son suficientemente profundos; la erosión laminar esta presente como lo atestigua el empobrecimiento de elementos finos en los horizontes superficiales y la frecuente presencia de un horizonte de acumulación de arcilla en superficie situado normalmente ente 20 y 40 cm de profundidad;

- los sectores de vertientes cortas pero escarpadas, muy rugosos y pedregosos, donde las cárcavas son pequeñas por el hecho de haber alcanzado ya la roca madre y donde la erosión es esencialmente laminar; las cárcavas aparecen en general en los talwegs[10] principales, y su socavamiento esta bloqueado por la fuerte pedregosidad.

Esta segregación aparece netamente en el espacio de las cárcavas tal como aparece en la Figura 7.5, donde los dos conjuntos se distinguen netamente, con sus elementos constitutivos. Las categorías seleccionadas para el análisis de correspondencias son señaladas en el Cuadro 7.3.

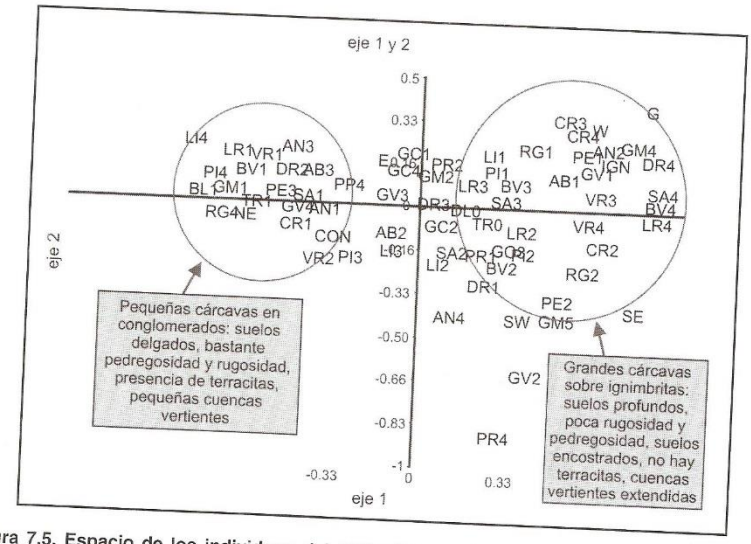


Figura 7.5. Espacio de los individuos del AFC cárcavas: las clases de variables permiten distinguir netamente varios tipos de cárcavas.

De hecho, en los estados de superficie caracterizados por la abundancia de elementos gruesos (costras de tipo INT y GC, capítulo anterior), se constata una correlación satisfactoria entre el contenido de elementos gruesos y la conductividad hidráulica a saturación (Figura 7.6). Sin embargo, los puntos de conductividad hidráulica extrema PIL 32 y 33 se separan bastante de esta regresión exponencial. Mientras más elevado sea el contenido en elementos gruesos, mayor será la conductividad hidráulica. La regresión múltiple que toma en cuenta el contenido de elementos gruesos y la porosidad de la tierra fina, mejora un poco la regresión (el coeficiente de determinación pasa de 0.42 a 0.52).

[10] *Ver glosario*

Cuadro 7.3. Conjunto de clases de variables tomadas en cuenta en el AFC "cárcavas".

Volumen de la cárcava (m3)	VR1 VR2 VR3 VR4	0-100 100-1000 1000-10 000 + de 10 000	longitud de la cárcava (m)	LR1 LR2 LR3 LR4	0-90 90-230 230-600 + de 600
Distancia entre lo bajo de la cárcava y el arroyo de agua (m)	DR1 DR2 DR3 DR4	0 10-35 35-150 150-250	Pendiente entre la cárcava y el arroyo de agua (°)	PR1 PR2 PR3 PR4	0 2-9 10-26 90
Superficie del impluvium (m²)	BV1 BV2 BV3 BV4	1000-10000 10000-25000 25000-250000 + de 250000	Litología del impluvium	CON IGN	Conglomerados Ignimbritas
Pendiente del impluvium (°)	PE1 PE2 PE3	0-9,5 9,5-15 15-25	Rugosidad del impluvium °	RG1 RG2 RG3	0-5 5-10 10-15
Tasa de vegetación del impluvium (%)	AB1 AB2 AB3	0 1-10 11-30	Tasa de cobertura de gramíneas (%)	GN1 GM2 GM3 GM4	0-3 3-15 15-31 + de 31
Tasa de cobertura del mantillo (%)	LI1 LI2 LI3 LI4	0-2 2-6 6-12 + de 12	Tasa de cobertura por anuales (%)	AN1 AN2 AN3 AN4	0 0,1-1,5 1,5-3 + de 1,5
Tasa de cobertura de las gravas (%)	GV1 GV2 GV3 GV4	0-15 15-25 25-35 + de 35	Tasa de cobertura de las arenas (%)	SA1 SA2 SA3 SA4	0 1-7 7-13 + de 13
Tasa de cobertura de las piedras (%)	PI1 PI2 PI3 PI4	0-3 3-9 9-20 + de 20	Presencia de bloques	BL0 BL1	NO SI
Tasa de superficie con gravas-costra (%)	GC1 GC2 GC3 GC4	0-11 19-28 28-40 + de 40	Tasa de superficie encostrada	CR1 CR2 CR3 CR4	0 0,5-10 10-21 + de 21
Presencia de Terracitas	TR0 TR1	NO SI			

A partir de estos resultados, se dibuja un escenario en el que el desmonte, la deforestación y sobre todo el exceso de pastoreo conducen a la formación de nuevos estados de superficie (¿Originados por la actividad humana?) que generan nuevos comportamientos hidrológicos en los suelos y en las vertientes. Más adelante se verá lo que sucede a la escala de las grandes cuencas vertientes.

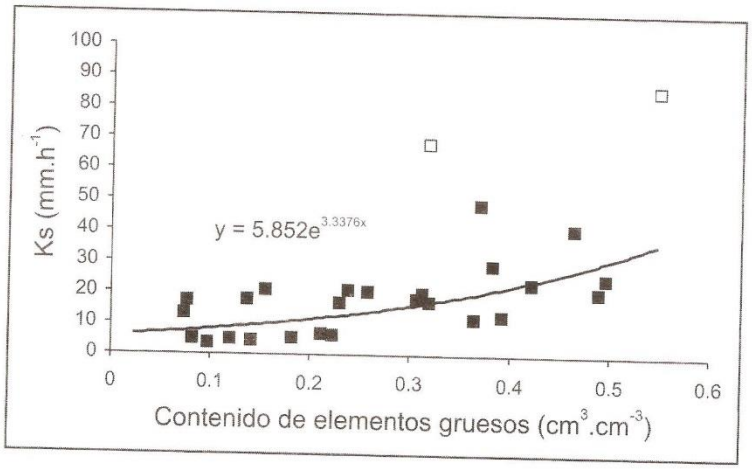


Figura 7.6. Correlación entre conductividad hidráulica y contenido en elementos gruesos.

El Cuadro 7.4 muestra cual puede ser el impacto del sobrepastoreo en el comportamiento hidrodinámico en suelos y vertientes.

Cuadro 7.4. Características físicas de los horizontes de superficie (0-5 cm) de un suelo en dos sitios vecinos.

Tipo de sitio	Ks (cilindro)mm/h	Densidad aparente	Porosidad (%)	Capacidad de campo (%)	Carbono total (%)
No pastoreado (sitios PIL32 et PIL 33)	77	1.21	49	10.5	1.4
Sobre pastoreado (sitios PIL 31 y PIL 34)	24	1.55	35	8	0.9

Al comparar los dos puntos de medición, localizados en la misma vertiente a 40 metros uno del otro a ambos lados de un cerco (en iguales condiciones de pendiente, tipo de suelo, exposición, etc.) pero en una parcela con diez años de clausura y en otra fuertemente sobrepastoreada, se pudo constatar que la densidad aparente se incrementa de manera significativa bajo el efecto del pisoteo del ganado y que inversamente, existe una neta disminución de la conductividad hidráulica a saturación (Ks), de la porosidad, de la capacidad de campo y del contenido en carbono total. Eso significa que el sobrepastoreo provoca una compactación del suelo y una fuerte disminución de la capacidad de infiltración y almacena-

miento del agua en el suelo (Dufeu, 1998; González Barrios *et al.*, 2000); esto a su vez implica una degradación de su estructura y de su fertilidad. Estas mediciones fueron hechas puntualmente.

El Cuadro 9.2 del Capítulo 9, muestra que a la escala de parcelas de 50 m^2, las consecuencias son más drásticas. En efecto, si la presencia de un árbol protege parcialmente de la erosión y del escurrimiento, en los pastizales sobreexplotados el pisoteo del ganado acrecienta netamente el escurrimiento y las pérdidas de suelo y tiene por corolario la aparición de una porosidad no funcional, llamada porosidad vesicular (Casenave y Valentin, 1898; Casenave y Valentin, 1992); los poros se cierran por la compactación del suelo y por los efectos del efecto *splash*[11] (dispersión) exagerado por la pérdida de protección vegetal del suelo en superficies cada vez más grandes.

A la escala puntual y de la parcela, se constatan las modificaciones drásticas en los estados de superficie y en las características físicas del suelo, que tienen consecuencias en el funcionamiento hidrodinámico de las vertientes. La sobre explotación del espacio parece tangible (ver capítulo siguiente) y tiene consecuencias evidentes a nivel del balance hídrico (González Barrios y Descroix, 2000). Su evidencia a escala local, como se ha mostrado aquí, debe esclarecerse en los próximos capítulos donde serán tratadas las modificaciones de los balances hídricos en superficies más grandes.

Conclusión

Los trabajos realizados considerando las propiedades físicas del suelo tuvieron como objetivo mostrar la extrema variabilidad espacial de esas propiedades y la dificultad de representarlas en el espacio (Poulenard, *et al.*, 1996; Viramontes y Descroix, 2000; Descroix *et al.*, 2002). Sin embargo, se pudieron determinar también las propiedades físicas correspondientes a la sobreexplotación de las tierras y en particular al sobrepastoreo. Este cambio drástico en los estados de superficie y en las condiciones de infiltración, modifican el régimen hidrológico hasta la escala de la cuenca vertiente de 5,000 km^2. En efecto, como lo muestran los trabajos en curso (Descroix *et al.*, 2003), la erosión laminar (o areolar) es más importante por el hecho de la extrema extensión espacial del sobre pastoreo y de las condiciones de superficie encostradas que genera. El resultado es, además de la generalización de las "terracitas" en las pendientes superiores a 20 por ciento una pedregosidad muy importante y extensa, que tiene solo una ventaja en términos de la preservación del medio, ya que constituye un recubrimiento que protege al suelo de la energía cinética de la lluvia.

[11] *Ver glosario*

Bibliografía citada

Barral, H. y E. Anaya. 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México. Publicaciones ORSTOM-INIFAP. Gómez Palacio, México No. 5, 78p.

Boyer, C. 1999. Variabilité spatiale du comportement hydrodynamique des versants dans la Sierra Madre Occidentale. Mémoire de maîtrise de géographie, Institut de Géographie Alpine, UJF-Grenoble, 108 p.

Cappus, C. 1960. Bassin expérimental de l'Alrance. Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. La Houille Blanche, juillet-août 1960, A.

Casenave A. et C.Valentin. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Col. Didactique. Editions ORSTOM, Paris, 229 p.

Casenave A. et C.Valentin. 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa. J. Hydrol. 130, 231-249.

De Ploey, J. 1991. Bassin-versants ravinés : analyse et prévisions selon le modele Es. Bulletin de la Société géographique de Liège 27, 69-76.

Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, J.L. González Barrios and M. Esteves. 2001. Influence of surface features and vegetation on runoff and soil erosion in the western Sierra Madre (Durango, North West of Mexico). Catena. 43-2 :115-135.

Descroix, L., J.L. Gonzalez Barrios, J.P. Vandervaere, D. Viramontes, and A. Bollery. 2002. An experimental analysis of hydrodynamic behaviour on soils and hillslopes in a subtropical mountainous environment (Western Sierra Madre, Mexico). Journal of Hydrology, 266: 1-14.

Descroix, L., J.L. González Barrios, D. Viramontes, M. Esteves, J. Poulenard, and A. Bollery. 2003. Gully and laminar water erosion on subtropical mountainous slopes : impact of land use changes and consequences on scale effect. Soumis à Earth Surface Processes and Landforms, 2003.

Dufeu, R. 1998. Les parametres du ruissellement et l'erosion, impact du surpâturage dans la Sierra Madre Occidentale (Mexique). Mem. Fin d'études ISTMO-ORSTOM 95p

Estrada, J. 1999. Importance et fonctionnement des petis barrages dans une zone semi-aride du Nord Mexicque. Thèse de l'Université Montpelier 2, 320 p.

González Barrios, J.L. et L. Descroix. 2000. Bilan et perspectives de la ressource en eau dans la Région Hydrologique n° 36 (Nord Mexique). RGA n°2-2000 Tome 88 115-128

González Barrios, J.L., L. Descroix, J. Poulenard, D. Viramontes, C. Boyer, A. Bollery, B. Inard-Lombard y S. Digonnet. 2000. Los suelos de la Sierra. Implicaciones en el transporte y el almacenamiento del agua. Memorias del Seminario internacional "Uso y manejo del agua en las cuencas hidrográficas del norte de México. IRD-INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, México.

Horton, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Am. Geophys.

Union, 14: 446-460.

Imbeaux, M.E. 1892. La durance, régimes, crues et inondations. Annales des Ponts et chaussées. Paris 7eme. Série. tome 3

Inard Lombard, B. 2000. Les causes et conséquences de l'émigration de la population de quatre communautés rurales de la Sierra Madre Occidentale (Nord Mexique). Mémoire de maîtrise de géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 118 p.

Poesen, J., F. Ingelmo-Sanchez and H. Mucher. 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. Earth Surf. Process. Landforms, 15:653-671.

Poulenard, J., L. Descroix et J. L. Janeau. 1996. Surpaturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale. RGA Revue de Geographie Alpine No. 2 T.84 Grenoble, France.

Roose, E., P. Blancaneaux et P. Freitas. 1993. Un test simple pour observer l'infiltration et la dynamique de l'eau dans les horizons du sol. Cahiers Orstom, série Pédologie, vol. 16, n°1 :43-72. Rossel, F. 1997. Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l´Equateur. Th. Doct. Univ., Montpellier II, 122,280.

Rossel, F. 1997. Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l´Equateur. Th. Doct. Univ., Montpellier II, 122,280.

Vandervaere J.P. 1995. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques : analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble. 329 p.

Vauclin, M. et J-L. Chopart. 1992. L'infiltrométrie milti-disques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. Agron. Trop., 46 :259-271.

Viramontes, P.D. 1995. Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas. Folleto científico n°3, publication Orstom-Cenid Raspa, Editor Cenid Raspa, Gomez-Palacio Durango, México.

Viramontes, P.D. 2000. Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidentale, Mexique). Causes et consequences de son evolution. Tesis doctoral Université Joseph Fourrier - Grenoble, Francia 449p.

Viramontes, P.D. et L. Descroix. 2000. Dégradation progressive du milieu et conséquences hydrologiques : étude de cas dans la Sierra Madre Occidentale (Nord Mexique) RGA n°2-2000 Tome 88 27-42.

Viramontes, D., L. Descroix, A. Bollery, et J. Poulenard. 2002. Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre Occidentale : processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis à la surexploitation. Géomorphologie, .3 (2002):239-252.