

Capítulo 6

Un encostramiento de los suelos que limita la infiltración

Jérôme Poulénard, José Luis González Barrios, David Viramontes, Luc Descroix,
Jean-Louis Janeau

Introducción

Los suelos intervienen en el ciclo del agua por sus propiedades hidráulicas (capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica, sortividad¹, etc.) que tienen relación directa con sus características fisicoquímicas (textura², estructura³, porosidad⁴, materia orgánica, etc.) Sin embargo, todas estas propiedades y características se modifican fácilmente por la actividad humana, lo cual implica una modificación en la respuesta hidrológica de los suelos. Los estudios en parcelas y cuencas vertientes experimentales en las diferentes regiones climáticas del mundo, muestran un incremento de los escurrimientos al talar los bosques y al compactar los suelos, sobre todo en superficies grandes. Numerosos estudios que han dado luz sobre esas interacciones: en clima tropical húmedo, (Fritsch, 1990; Calder *et al.*, 1995; Woo *et al.*, 1997; Scott Munro y Huang, 1997), en clima templado (Cosandey *et al.*, 1990; Galea *et al.*, 1993; Hudson y Gilman, 1993; Croke *et al.*, 1999); en clima semiárido y árido (Snelder y Bryan, 1995; Bergkamp, 1998).

¹ Ver glosario

² Ver glosario

³ Ver glosario

⁴ Ver glosario

A pesar de esta uniformidad de respuestas, los investigadores interesados en los procesos explicativos han dado una gran variedad de argumentos importantes (Ambroise, 1998); evocando el papel de la vegetación, los suelos y las propias modificaciones del medio con todos los factores que interactúan en el medio natural. El camino del agua y sus flujos pueden funcionar de manera diversa en el tiempo y en el espacio. El simple binomio de entrada (lluvia) y salida (escurrimiento) del agua en una cuenca vertiente no muestra la complejidad del camino del agua y su recorrido por el sistema.

Presentación de los suelos de la Sierra Madre

Dentro de las características del suelo implicadas en el transporte y el almacenamiento del agua⁵ se pueden citar las que tienen poca variabilidad espacio-temporal en la Sierra Madre Occidental como: la textura, la presencia de horizontes arcillosos, el tipo de vegetación y de mantillo. Sin embargo, otras características tienen una fuerte variabilidad espacio-temporal, y son importantes a considerar en los estudios de transferencia de agua en el suelo (Berndtsson y Larson, 1987). Dichas características son: la estructura, el estado de superficie es decir la presencia de costras, los elementos gruesos, la rugosidad, la abundancia de mantillo así como el grado de cobertura vegetal. Otros factores externos al suelo juegan en ocasiones un papel importante en la transferencia y el almacén del agua en las cuencas vertientes de la Sierra Madre. Tal es el caso de la intensidad de la lluvia, la topografía y la pendiente, el tamaño del impluvio⁶, el tamaño de las áreas deforestadas, la intensidad del pisoteo por el ganado y el sobre pastoreo. En este capítulo se presentarán algunos de los datos obtenidos en las cuencas vertientes experimentales (Figura 6.1).

Los suelos de la Sierra tienen, por todo esto, una fuerte variabilidad en lo que se refiere a su respuesta hidrológica, y a veces una gran fragilidad ante los procesos de erosión. El camino del agua en la Sierra Madre Occidental está regulado por las características biofísicas del medio moduladas por el impacto de la actividad humana, que hay que conocer bien.

Los suelos de la Sierra Madre Occidental se desarrollan sobre materiales de origen extrusivo puestos en superficie durante el Terciario, desde basaltos a riolitas. Son el principal escenario de los procesos de transferencia y almacenamiento del agua destinada a las actividades económicas del norte mexicano.

⁵ Ver glosario

⁶ Ver glosario

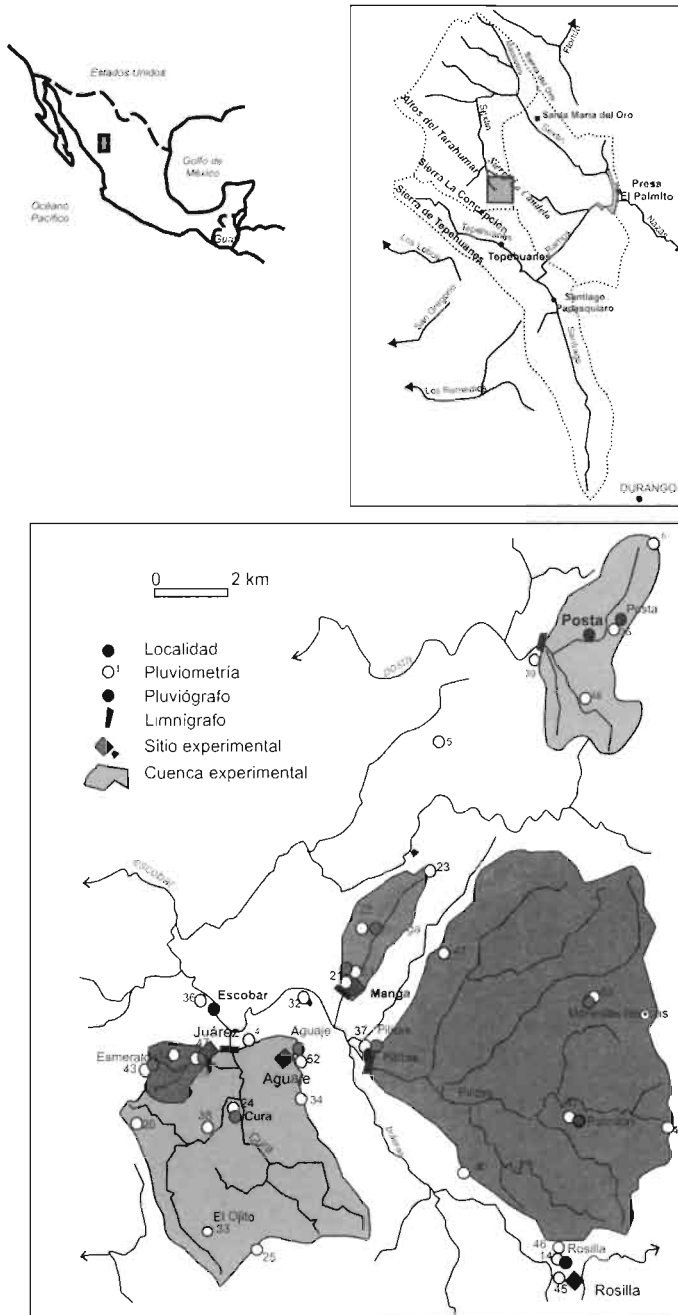


Figura 6.1. Cuencas vertientes experimentales de la Sierra Madre Occidental y red de estaciones de observación hidro-meteorológica.

Los suelos testifican una génesis edáfica distintiva del medio fersialítico⁷ modelado por las características geológicas, especialmente la presencia de grandes espesores de tobas y de ignimbritas del Mioceno así como de conglomerados, sometidos a la influencia antigua y reciente del clima.

Distribuidos a lo largo de la cadena montañosa entre 1500 y 3000 msnm, los suelos de la Sierra Madre Occidental son generalmente poco profundos y ricos en elementos gruesos; gravas, guijarros y piedras (Poulenard, 1995; Viramontes, 1995), y forman una cobertura discontinua con tres grandes tipos de suelos dominantes (FAO, 1998; González Barrios, 2000):

Los Leptosoles

Se agrupan a los antiguos Litosoles y Regosoles, son los más extendidos en la Sierra Madre. Son suelos poco profundos (menos de 0.3 m) distribuidos sobre todos los relieves masivos y sobre la mayor parte de las colinas y vertientes de la Sierra Madre Occidental.

Su gran extensión proviene del carácter relativamente joven de esta montaña donde los suelos se desarrollan poco, y dada la pendiente, están sometidos a una fuerte erosión que compensa ampliamente la velocidad de desarrollo de los perfiles, forzosamente lenta en esta región sometida a los fríos invernales y también a ocho meses de estación seca. En resumen son suelos poco evolucionados.

Los Cambisoles

De poca profundidad (0.6 a 2 m), pero con un perfil bien desarrollado, dan a la superficie del suelo un color beige, amarillo, rojo, violeta o verde, según el tipo de material de origen y su grado de alteración (González Barrios, 2000); se distribuyen en la mayor parte de las colinas y vertientes de la Sierra Madre. Las principales sub-unidades representadas son:

- los Cambisoles crómicos, que tienen un cromas⁸ elevado en su color;
- los Cambisoles vérticos, ricos en arcilla, con horizontes de estructura masiva y fisurados en seco;

⁷ Ver glosario

⁸ Ver glosario

- los Cambisoles gl icos, que tienen horizontes sometidos a la influencia de un manto freático.

Son los suelos cafés de la clasificación francesa. Se trata de suelos con un horizonte de alteración Bw bien marcado. Son suelos zonales del medio templado cuya presencia es bastante t pica en este medio tropical templado por la altitud. La presencia de variantes con carácter v rtico sin duda se relacionan con un clima templado caliente con estación seca marcada, es decir tendiente a subtropical, que no ha tenido inversión de estaciones secas y húmedas y que se asemejan a los climas mediterráneos.

De esto resultan:

- los procesos de rubefacción es decir de cristalización rápida de óxidos de fierro en hematita que tienen un poder cromático muy fuerte (rojo);
- filosilicatos II dominantes de tipo 2/1 (vermiculita, smectitas...) que pueden quizás explicar localmente un inicio del carácter v rtico (ver más abajo). Esto se aproxima a una génesis edáfica de tipo fersial tico.

El carácter g lico⁹ se debe relacionar evidentemente con los suelos de fondos bajos con mantos freáticos someros.

Los Feozems

Son los suelos más profundos (más de 2 m), se localizan en las planicies y fondos bajos de las vertientes. Muestran un color café oscuro con un perfil bien estructurado y desarrollado, rico en materia orgánica. Son suelos ricos en materia orgánica (relacionados a la vegetación herbácea), particularmente en el horizonte oscuro de superficie. Esto refleja una génesis en un clima típicamente contrastado con suficiente agua para que haya precolación en el perfil (los Feozems son suelos que sufren una cierta lixiviación de bases, pero no al punto de ser desaturados en superficie) pero con una estación seca igualmente marcada. En equilibrio especialmente en las zonas no muy erodadas, con vegetación importante de gramíneas y un buen funcionamiento biológico...

⁹ Ver glosario

Se observa una génesis edáfica global típica de las zonas de montaña tropicales con estaciones, húmeda y seca contrastadas. La abundancia de los Leptosoles muestra la intensidad de los fenómenos erosivos. Ciertos Cambisoles y Feozems presentan así características vérticas en presencia de arcillas abundantes. Sin embargo, no se desarrollan superficies de frotamiento en el perfil ni relieves de Gilgai¹⁰ en superficie.

El agua en los suelos de la Sierra Madre

Se realizaron numerosos análisis de suelo, *in situ* (medidas físicas realizadas en el campo) o en laboratorio, a los suelos de las cuencas experimentales y sus áreas de influencia en la Sierra Madre Occidental. En particular, más de 400 sitios fueron objeto de mediciones sistemáticas de la conductividad eléctrica (desde el cilindro simple hasta la infiltrometría con discos de succión controlada), densidad aparente, porosidad y granulometría. Esos elementos permitieron caracterizar el funcionamiento hidrodinámico de los suelos de la región a diferentes escalas.

Elementos gruesos

Como se mencionó anteriormente, los suelos de la Sierra Madre Occidental están caracterizados por una abundancia de elementos gruesos. Se puede constatar una distribución bi-modal con una de las modas hacia el 25 por ciento de la masa y otro hacia el 50 por ciento de la masa.

Esta presencia de elementos gruesos tiene repercusiones importantes en la dinámica del agua. En las pendientes inferiores a 20 por ciento, las piedras están fuera de la matriz y contribuyen a hacer el suelo poco permeable. En las pendientes más pronunciadas, las piedras están libres generalmente (por las razones citadas arriba) y contribuyen a favorecer la infiltración; en esas condiciones se puede constatar generalmente que cuando se levanta una piedra, el suelo es más blando y se nota una fuerte actividad biológica de la meso-fauna del suelo, lo cual no se observa en las vertientes poco escarpadas donde las piedras están selladas dentro de las costras superficiales.

¹⁰ Ver glosario

Esta fuerte pedregosidad esta ligada seguramente a la presencia de suelos poco espesos (Leptosoles) y por consecuencia a la proximidad de la roca madre que provee una abundancia de guijarros, piedras y bloques. En algunas zonas, también se puede concebir como la resultante de elementos gruesos por pérdida de partículas finas.

Si se razona en términos del conjunto de la zona de estudio, se pueden constatar tres caracteres remarcables en los suelos:

- una relación entre contenido de arcilla y contenido en elementos gruesos para el sitio CUR (cuenca del Cura);
- una relación entre la pendiente y el contenido de elementos gruesos para los sitios ESM (cuenca la Esmeralda, Figura 6.2) y para los sitios PIL (cuenca de Pilitas) hasta pendientes de 20 por ciento. Esto se interpreta evidentemente como una relación Pendiente \Rightarrow Erosión \Rightarrow Pérdida preferencial de partículas finas \Rightarrow Mayor contenido relativo en elementos gruesos;
- se constata al contrario que los pocos sitios en las pendientes más escarpadas (arriba de 25 ) presentan menores contenidos en elementos gruesos. Esto explicaria una erosión más baja en las pendientes fuertes (Figura 6.2).

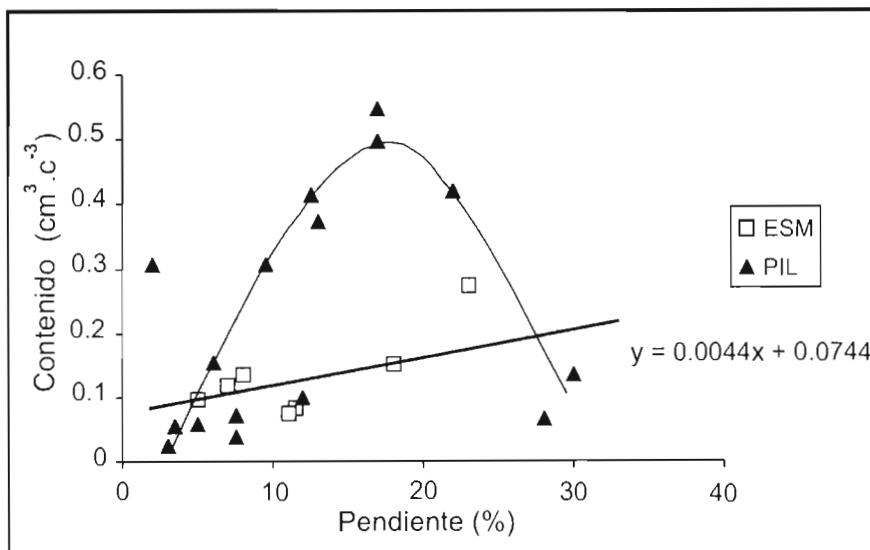


Figura 6.2. Relación entre la pendiente y el contenido en elementos gruesos, suelos de las cuencas Esmeralda y Pilitas.

Textura y contenido de materia orgánica

Se observa que las diferentes pruebas de infiltración fueron realizadas sobre suelos de textura muy variada y especialmente con fuertes fluctuaciones en el contenido de arcilla (de 8 a más de 40 por ciento). Las variaciones de contenido en materia orgánica en el horizonte de 0 a 10 cm son, por el contrario, mucho menores, de 0.5 a 2.5 por ciento (Figura 6.3).

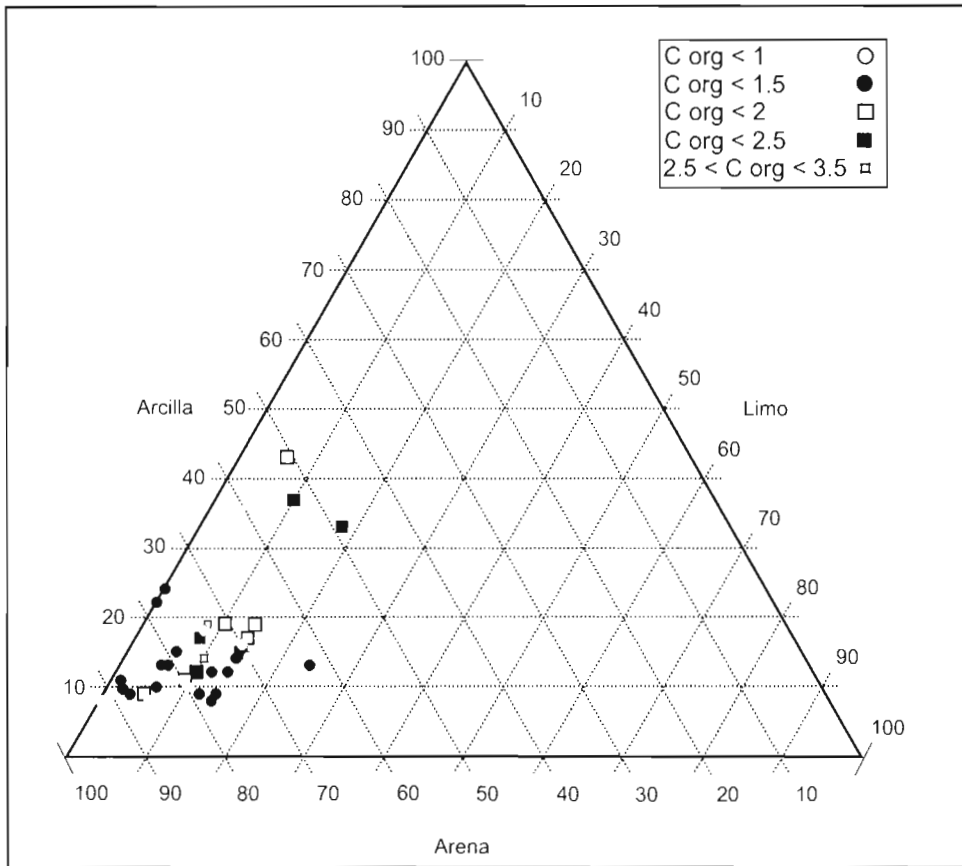


Figura 6.3. Repartición de los suelos en el diagrama de texturas, en función de sus contenidos en materia orgánica.

La cuenca el Cura presenta suelos con contenidos en arcilla estadísticamente más elevados que las otras tres. Sin embargo, la variación principal es una variación de sitios, a relacionar con el grado de evolución de los suelos y/o el contexto erosivo (zona de pérdida preferencial contra zona de depósito preferencial). Hay que notar que ninguna relación simple pudo establecerse para explicar la variabilidad de los contenidos en mate-

ria orgánica de los suelos.

Sorprende observar una variabilidad extrema en todas las propiedades físicas del suelo (Descroix *et al.*, 2002), tanto en términos de conductividad hidr aunica como de densidad aparente, porosidad y granulometria, en particular del contenido de arcilla y elementos gruesos. Esto se refleja seguramente por una extrema variabilidad de la capacidad de infiltración del suelo. La variabilidad del contenido en materia orgánica (y del contenido total de carbono) se relaciona con la dinámica actual de las superficies, las superficies desprovistas de vegetación activan fuertemente la mineralización del carbono de los suelos (Podwojewski *et al.*, 2002) y de la vegetación (sobre pastoreo, remplazo de encinos por pinos...). Los contenidos en carbono (en g kg^{-1} de tierra fina es decir menores a 2 mm) son bastante elevados mientras que lo almacenado calculado en 10 cm (ver más abajo) es menor, lo cual esta ligado a la abundancia de los elementos gruesos. Esto ilustra el problema de una expresión ponderal en la tierra fina ante la presencia de muchos elementos gruesos, y el interés de calcular el volumen de los contenidos. De esta forma,  Qu  sentido tiene que la tierra fina sea más rica en materia orgánica y en carbono, si representa una proporción muy baja del volumen?

Porosidad

Como se mencionó previamente, es delicado analizar la porosidad de la tierra fina cuando representa solamente del 30 al 60 por ciento del volumen total del suelo, por el enorme volumen de los elementos gruesos. Esta porosidad de la tierra fina puede naturalmente ser dividida en función de los resultados de las mediciones de capacidad de retención en agua con diferentes succiones. Aplicando la ley de Jurin Laplace se pueden disociar:

- la porosidad que corresponde a los poros de radio inferior a $0.2 \mu\text{m}$, capaces de retener el agua a $pF 4.2$ (pF = punto de marchitamiento permanente);
- la porosidad correspondiente a los poros de radio comprendido entre 0.2 y $10 \mu\text{m}$ (poros llenos de agua a $pF 2.5$ y vacíos a $pF 4.2$);
- la porosidad total (resultado del simple cálculo $1-d_{atf}/d_r$).

Se puede constatar que la porosidad real de tamaño inferior a $0.2 \mu\text{m}$ esta fuertemente ligada a la cantidad de arcilla (Figura 6.4). Se trata de una porosidad textural. Por el contrario, la porosidad de tamaño comprendido entre 0.2 y $10 \mu\text{m}$ donde seguramente se almacena la reserva de agua útil para las plantas, es remarcablemente constante (las dos rectas de regiresi on son casi paralelas).

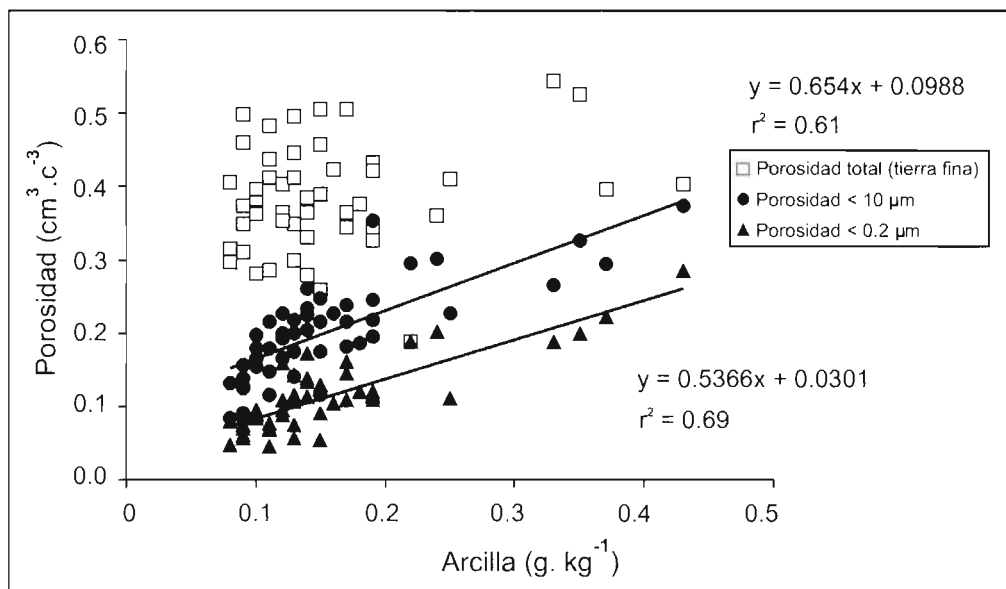


Figura 6.4. Relación entre la porosidad de los suelos y su contenido en arcilla en la Sierra madre Occidental.

Finalmente, la porosidad constituida de poros superiores a los 10 μm, es útil en las transferencias rápidas de agua y es claramente independiente de la cantidad de arcilla.

Estados de superficie en la Sierra Madre Occidental

Los estados de superficie constituyen un elemento que depende directamente del uso del suelo. La Figura 6.5 permite constatar que son probablemente el medio de clasificación del suelo que refleja más fielmente la información sobre sus características hidrodinámicas, a menudo marcadas por el uso que se da al suelo. Se puede constatar que no será en base al tipo de suelo, ni al tipo de roca madre, ni a la posición del sitio en la vertiente, lo que permitirá una segregación de clases de conductividad hidráulica tan marcada como de los estados de superficie.

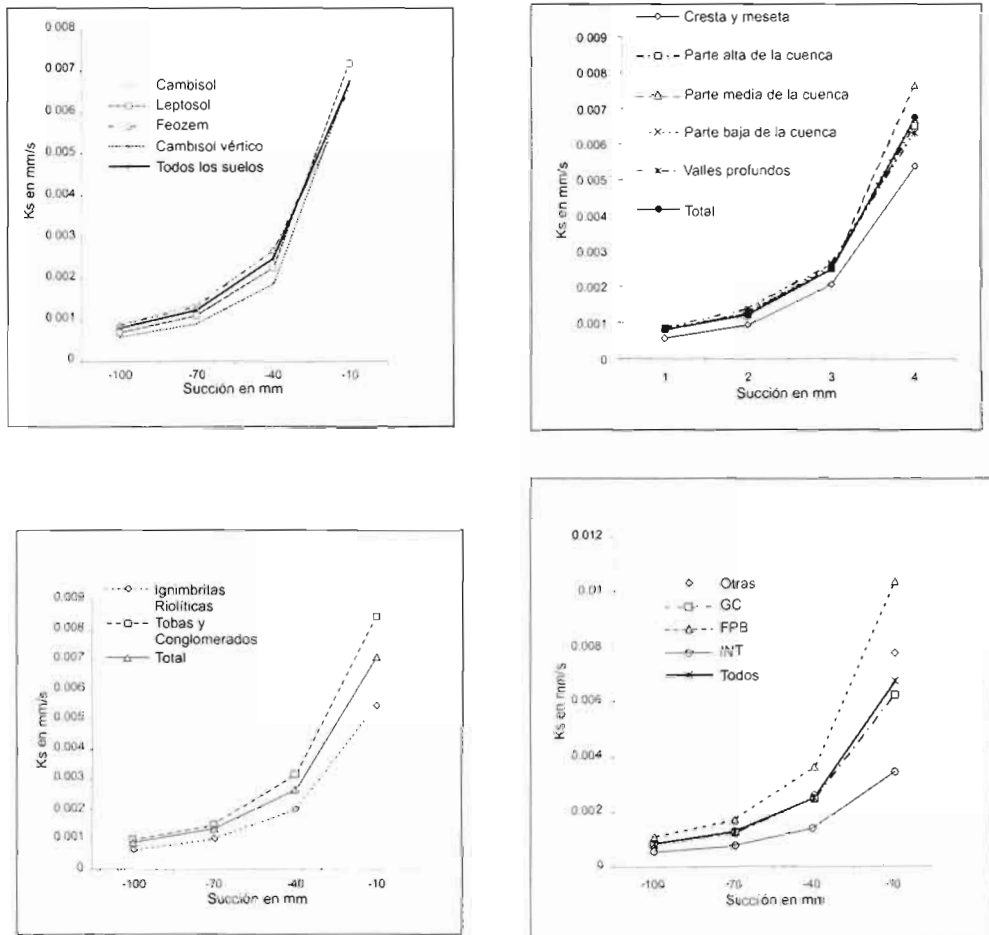


Figura 6.5. Clasificación de las medidas de conductividad hidráulica según los tipos de suelo, la litología, la posición del sitio de medición en la vertiente y los estados de superficie.

Estados de superficie ‘‘jóvenes’’

En las cuencas vertientes experimentales de la cuenca alta del Nazas, donde se realizaron las mediciones hidro-pluviométricas de 1994 a 1999 (Figura 6.1), se observó que todas las zonas situadas abajo de 2400 msnm habían sido transformadas en pastizales durante los últimos cincuenta años. Esto a partir de las haciendas y los pueblos que siguieron luego de la Reforma Agraria, como de los campamentos donde los empleados de grandes propiedades guardaban los rebaños. Poco a poco todo este espacio fue destinado a la ganadería.

Los sectores situados arriba de 2400 msnm son también, ante todo, ganaderos, aunque los bosques cubren aún un cierto porcentaje del espacio: más de la mitad cuando están arriba de 2700 msnm y más del 80 por ciento en las planicies más altas, alrededor de 2900 - 3000 msnm. Por consiguiente, a mayor elevación menor modificación de los pastizales. Por el contrario, en los sectores más elevados se realiza la tala de árboles con el objeto de aprovechar el bosque; la importante precipitación y la presencia de numerosos arbustos y residuos de explotación del bosque protegen por el momento los suelos del impacto del pisoteo.

Tipología

De la reciente degradación de la cobertura vegetal y del pisoteo del ganado se han formado varios tipos principales de estados de superficie¹¹ específicos (Figura 6.6): dos caracterizados por un encostramiento generalizado y uno por un empedramiento progresivo en la superficie. Estos tres estados de superficie cubren más del 95 por ciento del espacio en la zona consagrada exclusivamente a la ganadería. Los tres son recientes y su formación esta ligada al sobre pastoreo (Descroix *et al.*, 2001).

GC (costra con gravas o gravel-crust)

Este estado de superficie es típico de zonas de pastoreo con pendientes entre 2 y 20°; se trata de una costra delgada (Figura 6.6a) formada por partículas finas de suelo en las cuales se incrustan las gravas, lo que limita sustancialmente la infiltración del agua y favorece el escurrimiento. Su formación esta ligada al impacto de la lluvia (efecto *splash*¹²) en las superficies de suelo desnudo que se extienden cada vez más; este proceso desplaza a las partículas más finas del suelo que van a tapar los poros y a fijar las gravas (inferiores a 20 mm) en la matriz.

Ese tipo de costra se observa en las áreas con coeficientes de escurrimiento elevado, donde hay pérdidas de suelo importante, sobrepastoreadas y donde aumentan las superficies de suelo desnudo. Corresponde al tipo de costra definida también con ese nombre por Casenave y Valentin (1989). Los altos coeficientes de escurrimiento en ellas se explican por la incrustación de las gravas en la costra (Poesen *et al.*, 1990; Casenave y Valentin, 1992).

¹¹ Ver glosario

¹² Ver glosario

FPB (piedras y guijarros libres o free pebbles and blocks)

Este tipo de superficie se encuentra en el bosque, pero sobre todo, en los pastizales donde las pendientes sobrepasan 20^o. Se caracteriza por una fuerte proporción de bloques, piedras y guijarros (superiores a 20 mm), que no están incrustados en la matriz del suelo (Figura 6.6b). Si se mantiene la carga animal excesiva, después de la formación de un pavimento, aparecen las terracitas debido al pisoteo del ganado. Los guijarros no se incrustan en la matriz debido a su gran número y a su tamaño, pero sobre todo a la combinación de la pendiente y el paso incesante de los rebaños que se desplazan constantemente.

INT (costras endurecidas o indurated topsoil)

Este tipo de superficie se encuentra en todos los tipos de medio con pendientes bajas (menos de 10^o); la localización más frecuente es en el interfluvio o en los pastizales bajos de las vertientes (donde la arcilla no ha sido aún redistribuida o, por el contrario, donde se acumula). Su caracterstica es un endurecimiento de los horizontes superficiales (de 20 a 40 cm) en los Feozems rojos. Estos horizontes están fuertemente compactados por su alto contenido de arcilla (contrariamente al GC) y por el pisoteo incesante del ganado, pero no representan más que del 5 al 10 por ciento de la superficie de los pastizales (Figura 6.6c). En zona tropical, ese tipo de superficie tiende hacia una costra ferruginosa.

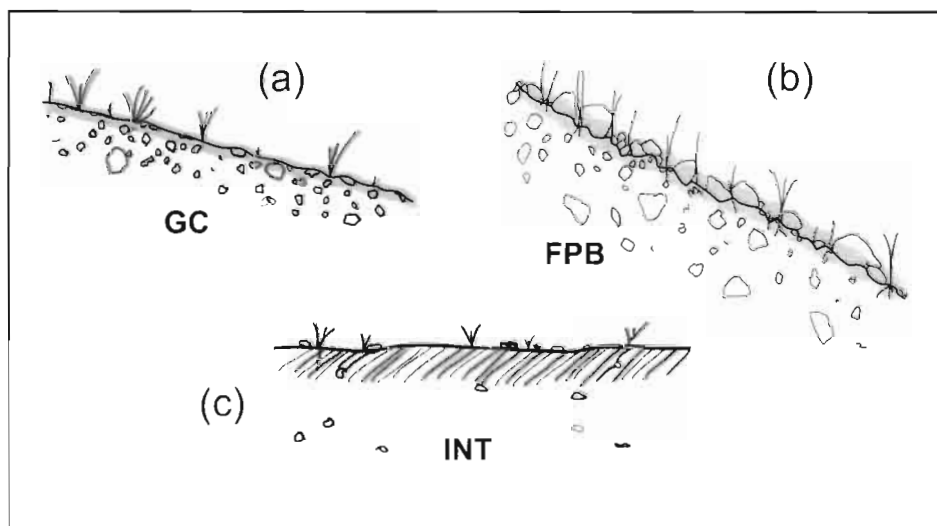


Figura 6.6. Perfil de tres principales estados de superficie descritos: a) GC (costra con gravas o gravel-crust; b) FPB (piedras y guijarros libres o free pebbles and blocks; c) INT (costras endurecidas o indurated topsoil).

Boyer (1999) realizó una cartografía de los estados de superficie en dos cuencas experimentales y mostró la lógica de su distribución espacial en función de las pendientes y de su localización en las vertientes.

Estados de superficie de la zona semiárida en un sector de montaña subtropical

Los estados de superficie actuales, postulados como resultado de un estado de erosión anterior, hacen pensar en los de zonas más áridas. Por ejemplo, las superficies "INT" y "GC" se encuentran también en la cuenca experimental "Atotonilco", en la zona semiárida, del norte centro de México. En ese otro sitio de observación hidrológica la precipitación anual es de 400 mm (contra 600 mm en promedio en las cuencas de la Sierra Madre), y los pastizales presentan grandes superficies de suelo desnudo no obstante de tener un mejor manejo (el sitio experimental se encuentra en un rancho privado de 40,000 hectáreas, con medio centenar de pozos disponibles para abrevar al ganado y con complemento de forrajes cuando los pastizales son muy poco productivos) (Estrada, 1999). Esto provoca la formación de organizaciones peliculares superficiales (OPS) y el endurecimiento significativo de los suelos de las vertientes. En resumen, se puede decir que en este medio definido como sub-húmedo donde la precipitación permite normalmente la presencia de pastizal muy denso con encinos, se encuentran también superficies típicas de las zonas semiáridas (Dufeu, 1998; Viramontes *et al.*, 2002).

Es difícil imaginar que, si el 95 por ciento del territorio esta sobrepastoreado y comprende uno de los tipos de superficie que se consideran como producto de la sobre-explotación de las herbáceas, esto no tenga un impacto hidrológico. No obstante que en las pendientes pronunciadas el proceso de degradación parezca "auto-frenado" por el recubrimiento de la superficie, este tipo de formación superficial esta más bien sujeta al escurrimiento al igual que los escasos sitios protegidos desde hace tiempo donde se pueden observar todavía los perfiles de suelo antes de su degradación.

Conclusión

Aparece claramente que el pisoteo del ganado y la degradación del estrato vegetal, modifican la estructura del suelo y el aspecto de las vertientes, favoreciendo el escurrimiento (por el cierre de poros, la compactación y el endurecimiento de la superficie del suelo). Por el contrario, en la superficie de vertientes más escarpadas, la degradación de la vegetación y de los suelos favorece una mayor pedregosidad que disminuye la velocidad del escurrimiento y la erosión al dispersar la energía cinética de las lluvias y favorecer la infiltración.

Es pues importante considerar cuales pueden ser las consecuencias de estas actividades y sus estados de superficie en el comportamiento hidrodinámico de las vertientes de la Sierra Madre Occidental.

Bibliografía citada

- Ambroise, B. 1998. Gen ese des d ebits dans les petits bassins versants ruraux en milieu temper e: 1-Processus et facteurs. *Revue de sciences de l'eau*. No. 4 471.
- Boyer, C. 1999. Variabilit e spatiale du comportement hydrodynamique des versants dans la Sierra Madre Occidental. Mémoire de ma trise de géographie, Institut de Géographie Alpine, UJF-Grenoble, 108 p.
- Bergkamp, G. 1998. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and micro-topography in semiarid shrublands. *Catena*, 33, 201-220.
- Berndtsson, R. and M. Larson. 1987. Spatial variability of infiltration in a semi-arid environment. *J. Hydrol.* 90, 117-133.
- Casenave A. et C. Valentin. 1989. Les  tats de surface de la zone sahelienne. 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.
- Calder, I.R., L.R. Hall, H.G. Bastable, H.M. Gunston, O. Shela, A. Chirwa and R. Kafundu. 1995. The impact of land use change on the water resources in sub-Saharan Africa: a modelling study of lake Malawi. *Journal of Hydrology*, 170, 123-135.
- Cosandey, C., D. Boudjemline, E. Roose et F. Lelong. 1990. Etude expérimentale du ruissellement sur des sols   v eg etation contrast ee du Mont Loz ere. *Z für Geomorphologie*, 34 (1), 61-73.
- Croke, J., P. Hairsine and P. Fogarty. 1999. Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 216, 56-77.
- Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, J.L. Gonzalez Barrios and M. Esteves, 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre. *Catena*, 43: 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.
- Dufeu, R. 1998. Les parametres du ruissellement et l'erosion, impact du surpâturage dans la Sierra Madre Occidental (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 Montpellier 2, 320 p.
- FAO/ISRIC/ISSS. 1998. World Soil Resources. Report No.81 FAO, Rome.
- Fritsch, J.M. 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins-versants en Guyane française. Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 390 p.
- Galea, G., P. Breil, et A. Ahmad. 1993. Influence du couvert végétal sur l'hydrologie des crues, modélisation à validations multiples. *Hydrol. Continent.*, vol. 8, n°1 :17-33.
- Hudson, J.A. and K. Gilman. 1993. Long term variability in the water balances of the Plynlimon cathments. *Journal of Hydrology*, 143 : pp 355-380.
- González Barrios, J.L. 2000. Los suelos de la sierra. Memorias del Seminario sobre el uso y manejo del agua en las cuencas hidrologicas de México. IRD-INIFAP CENID RASPA. Gomez Palacio, Dgo.
- Podwojewski, P., J. Poulénard, T. Zambrana and R. Hofstede. 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the paramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18: 45-55.
- Poesen, J., F. Ingelmo-Sánchez 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.
- Poulénard, J. 1995. Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre Occidentale. Projet ORSTOM-CENID RASPA, Mexique. Mémoire de fin d'études ISTOM. 82p.
- Viramontes, 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, Editeur Cenid Raspa, Gomez-Palacio Durango, México.
- Viramontes, D., L. Descroix, A. Bollery et J. Poulénard. 2002. Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre Occidentale : processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis à la surexploitation. *Géomorphologie*, 3: 239-25.
- Scott Munro, D. and L.J. Huang. 1997. Rainfall, evaporation and runoff responses to hillslope aspects in the Shenchong Basin. *Catena*, 29, 131-144.
- Snelder, D.J. and R.B. Bryan. 1995. The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya, *Catena*, 25, 105-116.
- Woo, M., G. Fang and P. DiCenzo. 1997. The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena*, 29: pp 145-149.

La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada

Obra colectiva dirigida y editada por
Luc Descroix, José Luis González Barrios y Juan Estrada Avalos

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

IRD
Institut de recherche
pour le développement

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Serapio Rendón # 83 Col. San Rafael México Distrito Federal 06470 México. www.inifap.gob.mx

Institut de Recherche pour le Développement (IRD) 123, rue Lafayette Paris 10ème. Francia. www.ird.fr

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA). Apartado Postal # 41 Lerdo Durango 35115 México.

IRD Representación en México. Cicerón # 609 Col. Los Morales México Distrito Federal 06470 México.

Título original de la obra:

“La Sierra Madre Occidental, un château d'eau menacé”. Editions IRD Paris.

Traducción y edición técnica en español:

José Luis González Barrios y Juan Estrada Avalos

Imagen en Portada:

Mirador de los altos en la Sinforosa, Guachochic, Chihuahua (foto Luc Descroix). Fondo: Imagen satélite de la Sierra Madre Occidental.

Diseño de Portada y Pre-prensa

Beatriz Ileana Martínez Román

El contenido de los capítulos, es responsabilidad de los autores.

Ejemplo de cita:

Viramontes Pereida, D. 2004. Los recursos hidráulicos en el centro norte de México: perspectiva histórica, pp. 33-42. En: Descroix, L., J.L. González Barrios, J. Estrada Avalos. (Editores). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP - IRD. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.

©Derechos Reservados

ISBN: 968-800-584-3

La presentación y disposición en conjunto de “La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada”, son propiedad de los editores y sus instituciones. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método electrónico, mecánico (incluyendo fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito de los editores.