

Capítulo 9

Agua amenazada por la degradación de los recursos vegetales

Luc Descroix, David Viramontes, Eva Anaya, Henri Barral, Alain Plenecassagne, José Luis González Barrios, Jeffrey Bacon, Laura Macias

Este capítulo es el resumen de los trabajos llevados a cabo en Boleras durante ocho años (1993 a 2000) sobre las consecuencias hidrológicas de los cambios de uso del suelo. Se determinó que la deforestación es rápida y el sobre pastoreo agudo. Probablemente este último con mayor influencia en el régimen de los arroyos a partir de la creación de nuevos estados de superficie que tienen un comportamiento hidrodinámico diferente de su condición original (suelo con vegetación). De esta manera, se llevaron a cabo mediciones precisas esencialmente en las áreas de pastoreo. Asimismo, se realizaron trabajos bajo condiciones de bosque que se describen más abajo, aunque las conclusiones en ellos son más difíciles de generalizar en el contexto de la Sierra Madre Occidental, dado que las "parcelas de bosque" (sitio La Rosilla estudiadas en 1995 y 1996), no fueron objeto de un aprovechamiento forestal como los que se observan en las grandes superficies de la Sierra de la Candela o de la Sierra Tarahumara. Además, los grandes bosques de pinos explotados se encuentran situados en los sectores más altos y más húmedos, con un rápido crecimiento de la vegetación secundaria y donde es posible que la alteración hidrológica como consecuencia de la deforestación sea mínima; esto está en proceso de investigación actualmente en el macizo de la Candela sobre el arroyo "Ciénega de la vaca". En fin se puede señalar que todos los habitantes de la Sierra con los que se mencionó este problema fueron unánimes al decir que los pastizales y el bosque se han degradado en forma significativa durante las últimas décadas y que antes había más agua

(y duraba más tiempo) en los arroyos.

La problemática científica y el impacto hidrológico de los cambios de uso del suelo

El impacto de los cambios de uso del suelo en el comportamiento hidrológico de las cuencas es actualmente uno de los mayores problemas que enfrentan los responsables de la administración y el manejo del agua. Esos cambios son de tipo muy diverso:

- la construcción de presas y de obras hidráulicas puede influir rápidamente en el régimen y el balance del agua de una cuenca;
- la urbanización puede que no modifique significativamente los coeficientes de escurrimiento, pero puede exagerar las crecientes y los estiajes de los arroyos como lo demostraron Rose y Peters (2001) en Georgia (Estados Unidos);
- el sobre pastoreo y la deforestación pueden provocar un impacto sobre el cual se centra este trabajo.

Los habitantes de la región francesa del Dauphiné o de Haute Provence observaron, desde los primeros desmontes, el incremento en el número de crecidas y su gravedad; esto fue objeto de múltiples especulaciones y querellas de expertos antes de ser estudiadas científicamente. Si la administración de los bosques ha sido llamada "aguas y bosques" en diferentes regiones del mundo, esto se debe a que la relación entre ambos se encuentra bien establecida. En los Estados Unidos, desde 1909, la cuenca experimental de Wagon Wheel Gap (Colorado) fue equipada para estudiar la influencia hidrológica de los usos del suelo (Hewlett *et al.*, 1969).

Los estudios experimentales suponen una comparación entre cuencas relativamente similares cuyo manejo forestal es diferente. Los estudios de ese tipo son numerosos, pero se restringen a los gastos totales y a los coeficientes de escurrimiento. Los estudios en parcelas y cuencas experimentales en diferentes regiones climáticas del mundo muestran un aumento de los escurrimientos cuando hay cortes del bosque y compactación del suelo, sobre todo si han tenido lugar en grandes superficies.

Los numerosos estudios que han abordado esas interacciones han demostrado los efectos: bajo clima tropical húmedo, (Fritsch, 1990; Calder *et al.*, 1995; Woo *et al.*, 1997; Scott Munro y Huang, 1997), mediterráneo (Kosmas, *et al.*, 1997; Sorriso *et al.*, 1994), templado (Cosandey *et al.*, 1990; Galea *et al.*, 1993; Hudson y Gilman, 1993; Caugant, 1998; Andréassian, 1999; Croke *et al.*, 1999); y en clima semi-árido y árido (Snelder et

Bryan, 1995; Bergkamp, 1998).

A pesar de esta uniformidad de respuesta, los investigadores interesados en los procesos explicativos han presentado argumentos muy diversos (Ambroise, 1998) que van desde la importancia de la vegetación y de los suelos, hasta las mismas modificaciones del medio; o a todos los factores que interaccionan en el medio natural. En resumen, el trayecto del agua puede variar y los flujos pueden funcionar de manera diversa en el tiempo y el espacio.

Hibbert (1967) produjo una de las primeras síntesis con datos experimentales de 39 cuencas, concluyendo que la reducción de cobertura forestal conduce a un incremento de los gastos y que inversamente, la reforestación de suelos desnudos disminuye los escurrimientos.

Bosch y Hewlett (1982) sintetizaron los resultados de experimentos realizados en 94 cuencas vertientes de diferentes regiones del mundo. Sus resultados confirmaron el aumento de los coeficientes de escurrimiento con la deforestación. También pusieron en evidencia los hechos siguientes:

- las respuestas del escurrimiento a los cambios de las coberturas vegetales en la cuenca son sensiblemente más importantes en los climas húmedos;
- las formas vegetales masivas tienen una gran influencia en el escurrimiento; las coníferas reducirían más los escurrimientos que los árboles de hoja ancha, las formaciones arbustivas tienen muy poco impacto;
- sin embargo, constataron que en el conjunto de resultados, la correlación entre la tasa de aumento del bosque y la reducción del escurrimiento es mediocre.

El primer punto fue perfectamente ilustrado por Hudson y Gilman (1993) en Plynlimon (oeste de Inglaterra) y por Cosandey (1995) en el Mont Lozère. En esos dos casos la precipitación anual es mayor a 2000 mm y los bosques de regeneración reducen la lámina escurrida anual en varios cientos de milímetros, comparados con las praderas naturales preexistentes.

Otra síntesis fue realizada por Stednick (1996), donde actualiza los datos de Bosch y Hewlett (1982) y confirma la relación entre los cortes forestales y el incremento de escurrimiento; además, fija un umbral de 20 por ciento de deforestación bajo el cual no interviene modificación alguna. El autor concluye que "la variabilidad de respuesta en los gastos anuales respecto a los cortes forestales sugiere un comportamiento complejo no

lineal". Esta síntesis integra cuencas de regiones muy diferentes en Estados Unidos, particularmente en el estado de Oregon, que también reciben más de 2000 mm de lluvia al año y donde las láminas de escurrimiento anual se incrementan de 200 a más de 400 mm cuando hay cortes forestales.

Sin embargo, en las zonas menos lluviosas los coeficientes de escurrimiento no se modifican en todos los casos y de manera importante como consecuencia de los cambios de uso del suelo. Esta es la razón por la cual es pertinente utilizar índices de gastos más que sus variaciones; para ello Tallaksen (1995) propone algunos índices que son empleados en los países tropicales secos.

Si es verdad que los escurrimientos se incrementan como consecuencia de la tala de los bosques o después de la transformación de éstos en praderas o en áreas de cultivo, los resultados muestran una gran diversidad de explicaciones que se relacionan con la vegetación, los suelos, las modificaciones del medio... Los datos de entrada (lluvia) y de salida (escurrimiento) del agua en una cuenca no muestran la fuerte complejidad del camino de agua que recorre el sistema. En un sector árido del pie-de-monte andino, Braud *et al.*, (2001) observaron resultados inesperados; en una cuenca ampliamente cubierta de arbustos y poco escarpada donde se produce dos veces más escurrimiento y diez veces más sedimentos que otra cuenca de la misma región más escarpada y poco cubierta por la vegetación. Estos autores habían mostrado antes que "la variabilidad espacial de la lluvia y de los tipos de suelo tenían una influencia en el escurrimiento, en un orden de grandeza superior al de la variabilidad espacial de la vegetación" (Braud *et al.*, 1999).

A escala de la parcela experimental, varios autores que han trabajado en diferentes bosques del mundo (Fristch, 1990; Sorriso *et al.*, 1994; Scott Munro y Huang, 1997; Croke *et al.*, 1999) constataron que los árboles y el mantillo constituyen un regulador de los escurrimientos y una pantalla protectora contra el impacto de las gotas de lluvia en la superficie del suelo.

En conclusión, parece que el bosque retiene el agua, es decir que su presencia disminuye los escurrimientos (en relación con otros tipos de vegetación o de uso del suelo). El bosque tiene sobre todo un papel regulador; su capacidad de retener agua le permite también restituir una parte a largo plazo, mucho tiempo después de los episodios de lluvia; esto hace que una cuenca vertiente forestal tenga estiajes y crecidas menos marcados que una cuenca cultivada o pastoreada.

El corte del bosque y el pisoteo excesivo provocan la aparición de nuevos estados de superficie que, con la desaparición progresiva de los sistemas radicales, modifican las condiciones de escurrimiento, de infiltración y de balance de agua, incluyendo las aguas de recarga de los mantos freáticos, al modificarse drásticamente los caminos del agua.

El encostramiento de los suelos, contrariamente al mantillo, determina en gran parte la amplitud del escurrimiento. Esto concuerda con las observaciones realizadas sobre los efectos de las costras superficiales del suelo (Valentin y Casenave, 1992; Janeau y Ruiz, 1992; Tarin, 1992; Vandervaere, 1995; Janeau *et al.*, 1999). El papel de los suelos con superficies pedregosas tiene un impacto ambivalente (Ruiz Figueroa y Valentin, 1983). Por un lado, las piedras pueden impedir la infiltración directa de las gotas de lluvia y por otro lado, pueden también aumentar los valores de infiltración ya que absorben la energía cinética de la lluvia (Poesen y Lavee, 1994; Valentin, 1994). Las piedras amortiguan el impacto de las gotas y permiten una disminución del efecto *'splash'* sobre los suelos al proteger su matriz. Además el conjunto de elementos gruesos de la matriz del suelo permite la infiltración del agua que cae directamente o proveniente de una lámina de agua escurrida desde lo alto de la vertiente.

El forestal Poncet (1981) presentó una posición original al decir que *-no es sino después de algunos años, y con la iniciativa de los investigadores soviéticos, que la comparación, por métodos estadísticos, de los escurrimientos de cauces o ríos de grandes cuencas, que cubren más de 1,000 km con diferente cobertura vegetal pero en condiciones similares (geología, relieve, clima...), pudo constatarse un incremento de los escurrimientos, y por consecuencia del balance hidrológico global de las grandes cuencas, paralelo al incremento de la tasa de cobertura forestal-*.

Eskurrimiento y erosión como consecuencia de la deforestación y del sobre pastoreo en la Sierra Madre Occidental

Al no poder deforestar grandes superficies para comparar escurrimientos y pérdidas de suelo antes y después de la deforestación, se procedió a comparar en un sitio los datos de una parcela bajo condiciones de bosque y una parcela deforestada.

Para estimar el impacto del sobre pastoreo, se seleccionaron parcelas en las que se sabía que fueron clausuradas desde hacia tiempo, y se compararon con parcelas pastoreadas (ver detalle del dispositivo en las Figuras 6.1). En el Capítulo 8 se mostró como el pisoteo por el ganado transforma los parámetros físicos del suelo. Los Cuadros 9.1 y 9.2 resumen las consecuencias del deforestación y del sobre pastoreo a la escala de la parcela.

¹ Ver glosario

Cuadro 9.1. Influencia de los factores ambientales en el escurrimiento y la erosión en bosque.

| Variables | Coefficiente de escurrimiento (%) | Pérdidas de suelo |
|---|--|--------------------------|
| Presencia/ausencia de árbol (parcelas de 50 m ²) | 23 | 133 |
| Sin árbol | 8.5 | 30 |
| Sin árbol pero con mantillo | 2.8 | 1.1 |
| Tipo de árbol (parcelas de 1 m ² , 7 repeticiones) | 9 | 74 |
| Pinos | 3 | 45 |
| Encinos | | |
| Pendiente (parcela de 1 m ² , 3 repeticiones) | 6 | 30 |
| 12 % | 9 | 110 |
| 33 % | 5 | 53 |
| 57 % | | |

Cuadro 9.2. Influencia de los factores ambientales en el escurrimiento y la erosión en áreas de pastoreo (parcelas de 50 m²).

| Variables (2 repeticiones en cada caso) | Coefficiente de escurrimiento (%) | Pérdidas de suelo |
|--|--|--------------------------|
| <i>Presencia/ausencia de árbol</i> | | |
| Sin árbol | 34 | 45 |
| Sin árbol pero en clausura | 19 | 12 |
| Con árbol | 19 | 26 |
| <i>Pendiente</i> | | |
| 12 % | 31 | 42 |
| 27 % | 21 | 29 |
| <i>Porosidad vesicular</i> | | |
| con | 35 | 70 |
| sin | 7 | 7 |
| <i>Pisoteo por el ganado</i> | | |
| con | 43 | 90 |
| sin | 8 | 7 |

Los valores del escurrimiento y pérdida de suelo dados en los Cuadros 9.1 y 9.2 aportan algunas informaciones:

- la cubierta de árboles protege bien al suelo. El amortiguamiento de la energía cinética de las gotas de lluvia, en las hojas, hace bajar sensiblemente los dos parámetros bajo los árboles; esto es más notorio en el bosque que en los pastizales, dado que las gramíneas y las herbáceas perennes protegen al suelo, a condición de no estar pastoreadas (se constata, por otra parte, que el pastizal sin árbol limita más el escurrimiento y las pérdidas de suelo, que el árbol en terreno sobrepastoreado);
- la pendiente no es un factor que agrava el escurrimiento y la erosión; sino al contrario, en los pastizales donde los estados de superficie lo dejan suponer (ver Capítulo 6); se observa un fenómeno inverso al esquema común de todos los pastizales; las pendientes fuertes tienen un recubrimiento que las protege, producto del estado de erosión anterior y presentan un escurrimiento y pérdidas de suelo inferiores a las áreas de poca pendiente que están encostradas frecuentemente. En general, se pudo observar que las áreas empedradas tienen una macro-porosidad importante y una actividad biológica (meso-fauna) desarrollada bajo las piedras; esto puede incrementar la infiltración y la conductividad hidráulica. Durante la lluvia, se observa el impacto de las gotas en las piedras y el escurrimiento del agua sobre ellas hasta las áreas más permeables situadas abajo;
- en el bosque, los encinos protegen mejor el suelo que los pinos, esto se debe sobre todo a que su mantillo es más espeso y cubre más;
- la presencia de porosidad vesicular (poros inactivos por estar tapados) es un factor que exagera netamente el escurrimiento y la erosión;
- lo mismo pasa con el pisoteo del ganado según el Cuadro 9.2.

Las parcelas deforestadas e instrumentadas, fueron taladas y pastoreadas varios años antes y presentaban en gran parte de su superficie las características de un suelo endurecido cuya formación es favorecida por el gran contenido en arcilla y el pisoteo del ganado (terrazas y planicies de las crestas, partes bajas de las vertientes). Cuando afloran los horizontes ricos en arcilla, su erosión es responsable de la formación de costras espesas (tipo INT). Al final de la época seca se pueden observar fisuras de retracción en el horizonte B.

Al tratar de establecer la influencia inmediata de la deforestación y ante la imposibilidad de desmontar una superficie de 10,000 hectáreas tal y como fue realizado por el Servicio de Investigaciones Agrícolas de Estados Unidos en Tombstone (Arizona), se procedió a deforestar una micro cuenca de 400 m² (Figura 9.1 a, b y c).

El desmonte del área se realizó al principio de la temporada de lluvias de 1995 y sus consecuencias fueron las siguientes:

- el escurrimiento es ligeramente superior en la micro cuenca desmontada desde el primer año, la diferencia se incrementa en el segundo año, probablemente por el hecho de la desaparición progresiva del mantillo (Figura 9.2);
- inversamente, las pérdidas de suelo son más bajas durante el primer año en la micro cuenca desmontada; esto es debido probablemente a las ramas y residuos del corte que atrapan los sedimentos, este efecto persiste pero de menor manera durante el segundo año (Figura 9.3).



Figura 9.1. Las micro cuencas de la Rosilla. A la izquierda (a) micro cuenca con bosque; a la derecha (b) micro cuenca antes del corte; y (c) justo después del corte.

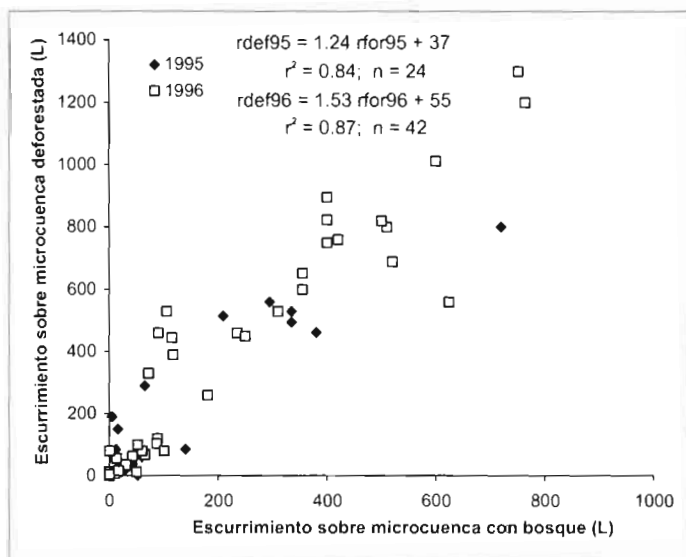


Figura 9.2. Relación entre escurrimento en la micro cuena deforestada (rdeb) y escurrimento en la micro cuena con bosque (rboi) para 1995 y 1996.

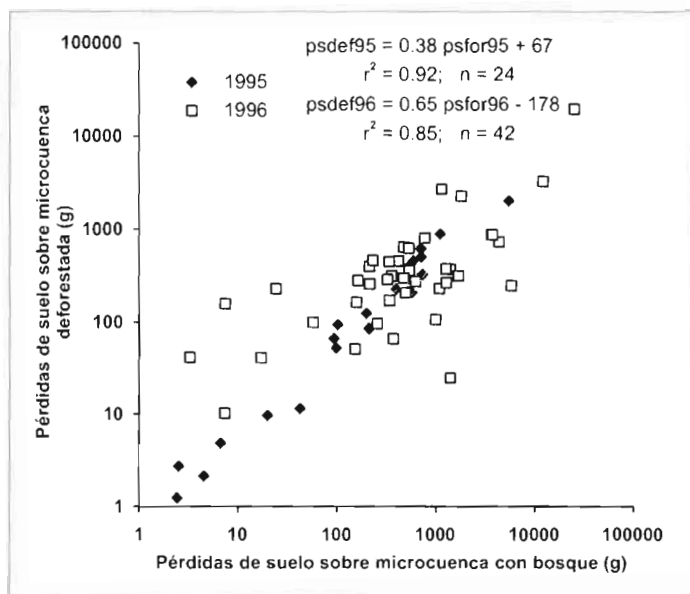


Figura 9.3. Relación entre pérdidas de suelo en la micro cuena deforestada (psdeb) y la micro cuena con bosque (psboi) para 1995 y 1996.

Consecuencias hidrológicas a nivel de grandes cuencas vertientes

Después de investigar las modificaciones del escurrimiento a nivel de parcelas y de micro cuencas vertientes, se intentó determinar si la evolución de los usos del suelo podía tener una influencia en el comportamiento hidrológico de las grandes cuencas vertientes. Se emplearon los datos de gastos diarios de dos estaciones que controlan las dos ramas tributarias del río Nazas, aguas arriba de de la presa El Palmito. Se trata de la estación Salomé Acosta en el río Ramos (cuenca vertiente de 7,130 km²) y de la estación Sardinás en el río Sextín (5,060 km²). Los datos utilizados son los gastos promedios diarios de 1970 a 1998 presentados en el Cuadro 9.3 (Viramontes y Descroix, 2002).

Cuadro 9.3. Tiempo de respuesta promedio total y por década de las cuencas vertientes.

| | | Total | Separación por década | | | Diferencia años 70 y 90 |
|---------------|---------------------------|-------|-----------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| | | | 1970 – 1979 | 1980 – 1989 | 1990 – 1998 | |
| Cuenca Ramos | Número de eventos | 2273 | 836 | 847 | 590 | 1.6 % |
| | Promedio (días) | 1.45 | 1.45 | 1.46 | 1.43 | |
| | Desviación estándar | 0.38 | 0.38 | 0.36 | 0.40 | |
| | Coefficiente de variación | 0.26 | 0.26 | 0.25 | 0.28 | |
| | t Student (80 %) | | * | * | * | |
| | | | 1971 – 1979 | 1980 – 1989 | 1990 – 1997 | |
| Cuenca Sextín | Número de eventos | 1720 | 615 | 701 | 404 | 5.5 % |
| | Promedio | 1.32 | 1.34 | 1.34 | 1.26 | |
| | Desviación estándar | 0.36 | 0.35 | 0.33 | 0.41 | |
| | CV | 0.27 | 0.26 | 0.25 | 0.32 | |
| | t Student (80 %) | | ☺✓ | * | ☺✓ | |

* Diferencia de medias no significativa

☺✓ Diferencia de medias significativa

Antes de proceder al an alisis estadístico de los datos, de los gastos diarios, se asegur  primero que las series estudiadas no contuvieran ninguna tendencia o anomalía que pudiera influir en el tratamiento y que pudieran hacerlo erróneo, para esto se utilizaron los procedimientos de investigación de tendencias propuestos por el programa Khronostat del IRD (Viramontes, 2000).

Posteriormente se utilizaron tres herramientas para detectar las evoluciones de los gastos a partir de sus registros entre los años 1970 y 1990.

La primera se basa en la descomposición de los gastos del cauce en gastos base y gastos de crecida, según un algoritmo propuesto por Gustard *et al.* (1989) citado por Humbert y Kaden (1994). Se trata de distinguir en el gasto de un escurrimiento, la parte que corresponde a la lluvia que se acaba de producir (crecida) y la parte que corresponde a las aportaciones retrazadas (mantos freáticos temporales, vaciado lento de los suelos, etc.) y que se producen cuando no llueve (gasto de base). La Figura 9.4 muestra que la relación entre gasto de crecida (Kcrue) y el gasto de base (Kbase) aumenta sensiblemente entre la primera mitad (1970-1984) y la segunda (1985-1998) del periodo estudiado para el río Ramos; se nota la misma tendencia pero menos pronunciada para el río Sextín (Viramontes y Descroix, 2002).

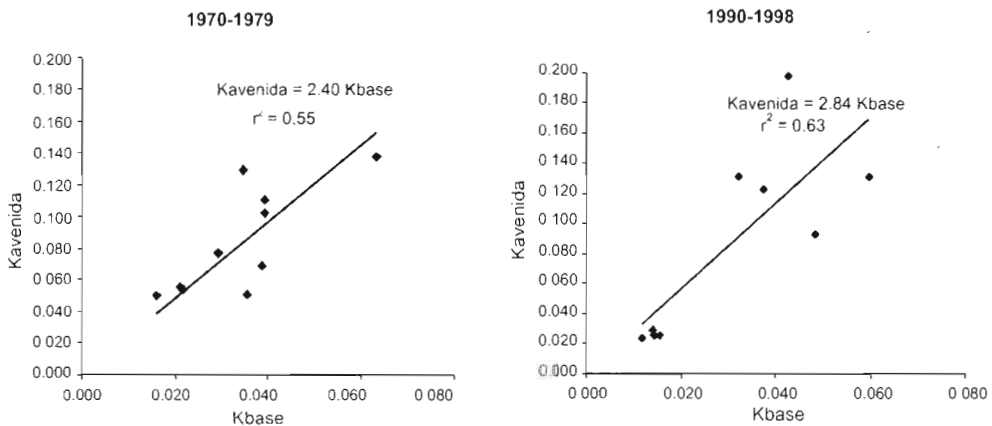


Figura 9.4. Evolución de la relación entre coeficiente de escurrimiento de crecida (Kcrue) y coeficiente de escurrimiento de base (Kbase) durante los periodos 1970 - 1979 y 1990 - 1998 en la cuenca del río Ramos.

La segunda herramienta analiza el tiempo de respuesta de los escurrimientos de agua, es decir, el tiempo que transcurre entre la precipitación y la aparición o aumento del escurrimiento en la salida de la cuenca. En este caso también se constata una ligera evolución, en esta ocasión de manera más significativa en la cuenca del Sextín que en la

cuenca del Ramos; el tiempo de respuesta de la primera disminuye 5.5 por ciento entre la década de 1970 y la década de 1990, mientras que para la cuenca del Ramos disminuye solo 1.6 por ciento.

Esta disminución significa que el escurrimiento es más rápido y que la retención del agua en la cuenca vertiente es inferior a lo que era antes. Esto es debido probablemente a la disminución de la cobertura vegetal y a las modificaciones que ello han ocasionado en los estados de superficie.

La última herramienta utilizada fue el parámetro del modelo Nazasm (Descroix *et al.*, 2002); este parámetro de decremento de la humedad traduce el tiempo necesario para que el suelo retome su estado de humedad. El parámetro *alfa* es el inverso del tiempo de escurrimiento del suelo: mientras más elevado sea, menor será el tiempo de escurrimiento del suelo. El Cuadro 9.4 permite constatar que en las dos cuencas, se presenta un incremento en este parámetro entre la década de 1970 y la década de 1990. Esto indica una disminución del tiempo necesario para que el suelo recobre su estado de humedad, lo que podría ser una consecuencia de la modificación de los estados de superficie del suelo.

Cuadro 9.4. Valores de los parámetros del modelo Nazas para el río Ramos y el río Sextín.

| Parámetros de la cuenca del Ramos | Período | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1970 – 1998 | 1970 – 1979 | 1980 – 1989 | 1990 – 1998 |
| Capacidad máxima del reservorio (H_{max}) | 220 | 220 | 220 | 220 |
| Parámetro de decremento de la humedad (<i>alfa</i>) | 0.031 | 0.02 | 0.029 | 0.04 |
| Parámetros de la cuenca del Sextín | Período | | | |
| | 1971 – 1997 | 1971 – 1979 | 1980 – 1989 | 1990 – 1997 |
| Capacidad máxima del reservorio (H_{max}) | 130 | 130 | 130 | 130 |
| Parámetro de decremento de la humedad (<i>alfa</i>) | 0.04 | 0.040 | 0.054 | 0.3061 |

Discusión y conclusión

En relación a las cifras dadas en el Cuadro 9.1, donde la parcela sin mantillo se encontraba deforestada desde hacia algún tiempo, se ve bien que finalmente una deforestación reciente tiene poco impacto en el escurrimiento. No obstante, en la parcela de 50 m² “sin árbol pero con mantillo” recién deforestada (Cuadro 9.1), ¿Cómo se puede explicar que

presenta el triple de escurrimiento y 25 veces más pérdida de suelo, cuando las dos micro cuencas tuvieron, para los mismos años de medición, modificaciones mucho menores y sutiles? Probablemente esto se encuentre ligado al hecho de que las micro cuencas fueron deforestadas como si se tratara de un verdadero corte: se dejaron residuos del corte lo cual limitó considerablemente los efectos del desmonte tanto en términos de erosión como de escurrimiento.

Sin embargo, no fue posible darles seguimiento por más de dos años consecutivos. Por ello, resulta difícil señalar lo que pasaría con las micro cuencas, más allá de esos dos años, respecto al comportamiento hidrológico aparentemente poco modificado por el corte. No se puede saber si el mantillo que cubría el suelo se perdió y lo dejó desnudo, y por lo tanto más propenso a la degradación por el fenómeno *splash* y el escurrimiento. Hay que señalar de todas formas que los resultados del Cuadro 9.1 muestran que el desmonte total hace más frágil a los suelos y aumenta de manera importante el escurrimiento y la pérdida de sus partículas.

La comparación de los Cuadro 9.1 y 9.2 muestra que los coeficientes de escurrimiento y de pérdidas de suelo no son muy diferentes bajo el bosque y bajo el pastizal. Solo las partes de los bosques verdaderamente situados bajo la corona de los árboles son protegidas por espesos mantillos y son más permeables y menos sujetas a la erosión.

Las investigaciones llevadas a cabo en otros sitios sobre el impacto de la deforestación y el funcionamiento hidrológico de las cuencas, se realizaron en zonas muy húmedas (Guyana, Oregon, país de Gales, Mont Lozère). En estas zonas la presencia del bosque se traduce en una disminución de 200 a 400 mm de la lámina de agua escurrida al año. En nuestro caso, la lámina media anual de escurrimiento es de 100 mm, por lo tanto resulta difícil estimar el impacto inmediato de la deforestación al no contar con una cuenca forestal específicamente equipada, además de que este impacto puede también ser una consecuencia del sobrepastoreo y de los cambios de los estados de superficie que ello provoca. Por esta razón se emplearon índices más sensibles en el estudio de las dos cuencas grandes, ya que la evolución esperada es evidentemente menor en la Sierra Madre Occidental, donde la lámina escurrida anual es de aproximadamente 100 mm. Todo esto condujo a investigar nuevos índices del régimen de escurrimiento.

Bibliografía citada

Ambroise, B. 1998. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu temperé: 1-Processus et facteurs. *Revue de sciences de l'eau*. No. 4 471-495

- Andréassian, V. 1999. Indicateur d'impact de l'évolution du couvert forestier sur la ressource en eau à l'échelle des bassins versants des Cévennes et de la Montagne noire. Programme Environnement, Vie et Société CNRS, Rapport Final, 55 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.
- Bosch, J.M., and J.D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of hydrology*, 55 : pp 3-23.
- Braud, I., P.C. Fernández, and F. Bouraoui. 1999. Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. *J. of Hydrol.*, 216:155-171.
- Braud, I., A.I.J. Viche, J. Zuluaga, L. Fornero, and A. Pedrani. 2001. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling. *J. of Hydrol.*, 254:124-144.
- 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.
- Caugant, C. 1998. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique de bassins versants du Massif Central. Mém. DEA, Géomorphologie. Université Paris 1, Cemagref, 153 p.
- Cosandey, C., D. Boudjezmine, E. Roose et F. Lelong. 1990. Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. *Z für, Geomorphologie*, 34 (1), 61-73.
- Cosandey, C. 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? *Annales de Géographie*, 581-582, pp 7-25.
- 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., J.F. Nouvelot. and M. Vauclin. 2002. Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico). *Journal of Hydrology*, 263:114-130.
- 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.
- Gustard, A., L.A. Roald, S. Demuth, H.S. Lumadjeng, and R. Gross. 1989. Flow regimes from experimental and network data (FRIEND). Institute of Hydrology, Wallingford (UK), 2 vol.
- Hewlett, J.D., H.W. Lull, and K.G. Reinhart. 1969. In defence of experimental watersheds. *Water Resour. Res.*, 5 (1): 306-316.

- Hibbert, A.R. 1967. Forest treatment effects on water yield. In: W.E. Spooer and H.W. Lull (Editors). *Int. Symp. For Hydrol.*, Pergamon, Oxford, 813 p.
- 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.
- Humbert, J. et U. Kaden, 1994. D etection des modifications de l'écoulement fluvial au moyen de l'indice de débit de base. *Revue de Géographie Alpine*, 82 : 2 pp 25-36.
- Janeau, J-L., et R. Ruiz de Esparza. 1992. Cartographie des  tats de surface d'une toposéquence représentative du bassin versant de San Ignacio. In *Actas del Seminario Mapimi*. Instituto de Ecología - ORSTOM - CEMCA. México, 161 - 176.
- Janeau J.L., A. Mauchamp and G. Tarin. 1999. The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern Mexico and their influences on the system hydrodynamics. *Catena*, 37, 165-173.
- Kosmas, C., N. Danalatos, L.H. Cammerat, M. Chabart, J. Diamantopoulos, R. Farand, L. Gutierrez, A. Jacob, H. Marques, J. Martinez-Fernandez, A. Mizara, N. Moustakas, J.M. Nicolau, C. Oliveros, G. Pinna, R. Puddu, J. Puigdefabregas, M. Roxo, A. Simao, G. Stamou, N. Tomasi, D. Usai, and A. Vacca. 1997. The effects of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*. 29 : pp 45-59.
- Poesen, J. and H. Lavee. 1994. Rock fragments in top soils : significance and processes. *Catena*, 23 (1-2) 1-28.
- Poncet, A. 1981. Interactions For ts et climats, in "Eaux et climats", mélanges offerts en homage   CH. P guy, Grenoble CNRS, 1981, pp 445-461.
- Rose, S. and N.E. Peters. 2001. Effects of urbanisation on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrol. Process.* 15 : 1441-1457.
- Ruiz Figueroa, J.F. et C. Valentin. 1983. Effects of various types of cover on soil detachment by rainfall. Ed. Orstom, Abidjan, 17 p.
- 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.
- Sorriso-Valvo, M., R.B. Bryan, A. Yair, F. Lovino and L. Antronico. 1994. Impact of afforestation on hydrological response and sediment production in a small Calambrian catchment. *Catena*, 25 : pp 89-104.
- Stednick, J.D. 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176:79-95.
- Tallaksen, L.M. 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. of Hydrol.*, 165: 349-370.

- Tarin, G. 1992. Caracterización hidrodinámica de suelo a nivel de una formación en mogote, utilizando un simulador de lluvia en la Reserva de la Biósfera de Mapimí, Durango. Tesis profesional, Biología, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México. 125 p.
- Valentin, Ch. and A. Casenave. 1992. Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 6: 1667-1673.
- Valentin, C. 1994. Surface sealing as affected by various rock fragment cover in West Africa. *Catena*, 23 (1-2) 87-98.
- 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.
- Viramontes, D. 2000. Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidentale, Mexique). Causes et conséquences de son évolution. Thèse de géographie de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1 : 450 p.
- Viramontes, D. et L. Descroix. 2002. Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre Occidentale (Mexique). *Revue des Sciences de l'Eau* ,15/2: 493-513.
- 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.