

LA INTERRELACIÓN DEL BOSQUE Y EL AGUA EN LA CUENCA HIDROGRAFICA

Juan Ángel Mintegui Aguirre y José Carlos Robredo Sánchez

Departamento de Ingeniería Forestal. Unidad de Hidráulica e Hidrología. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Ciudad Universitaria. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: juanangel.mintegui@upm.es

Resumen

Se analiza la incidencia de las masas arboladas en el comportamiento de los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de una cuenca hidrográfica; diferenciando los cortos pero intensos intervalos en los que transcurren los eventos torrenciales, de los largos periodos que discurren entre eventos torrenciales consecutivos. Durante los primeros el bosque amortigua los efectos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca. En los periodos restantes las masas arboladas continúan incidiendo en el régimen hidrológico de la cuenca a través de los procesos transpiración, interceptación y condensación; pero también constituyen la vegetación climática o pseudoclimática, asegurando de este modo la estabilidad biológica y la capacidad de regeneración de los ecosistemas de la cuenca, un aspecto esencial en el esquema restaurador de cuencas degradadas mediante repoblaciones forestales de carácter protector. Asimismo se analizan otros usos del suelo alternativos al arbolado para diferentes zonas de la cuenca vertiente, compatibles con su conservación y aprovechamiento sustentable. Ante la utilización del bosque en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente es preciso contemplar tres aspectos: 1) La protección de la cuenca de los efectos que los eventos torrenciales puedan causarla. 2) Las necesidades hídricas de la vegetación arbolada. 3) La conservación del ecosistema en un estado tal, que sea posible la recuperación de su vegetación hacia estados superiores de su evolución climática. La estructura del documento se ciñe a los fundamentos físicos y a los principios lógico-analíticos que regulan los procesos estudiados; complementándose con los resultados de algunas de las investigaciones más señaladas relativas a su contenido, que contribuyen a corroborar las conclusiones presentadas.

Palabras Claves: *Ciclo del agua, Geo-dinamismo torrencial, Bosque, Balances hídricos*

EL BOSQUE EN EL CICLO DEL AGUA

Es evidente que los recursos hídricos se localizan dentro del ciclo del agua y resulta demostrable que el bosque, entendido como suelo forestal y cobertura arbolada, incide en dicho ciclo; pues condiciona el movimiento del agua dentro de la cuenca vertiente, regulando su velocidad de escorrentía e incrementando su

infiltración en el suelo, luego interviene en lo que se puede definir como la componente horizontal del ciclo del agua. A ello hay que añadir la transpiración de la masa arbolada del bosque, que impulsa una cierta cantidad de agua (en ocasiones elevada) hacia la atmósfera, cerrando de este modo la componente vertical de dicho ciclo en la cuenca, que se inicia con las precipitaciones. Queda por aducir que también sobre estas

últimas interviene el bosque: por un lado, interceptándolas con su cubierta aérea cuando se trata de precipitaciones verticales; por otro, cediendo la misma para facilitar en ella la formación de precipitaciones horizontales, principalmente condensaciones y la formación de nieblas (Figura 1).

De acuerdo con lo expuesto, la gestión forestal, que es el instrumento que maneja el bosque a lo largo del tiempo, interviene en el ciclo del agua y en consecuencia incide:

- a) En la dinámica del agua en la cuenca vertiente, especialmente cuando los aguaceros que acontecen en ésta, causan fenómenos geo-torrenciales en la misma.
- b) Sobre los recursos hídricos.

Dicha incidencia es muy diferente según se trate del periodo en el que tiene lugar el evento torrencial o la fusión repentina del manto de nieve en la cuenca (que no suele superar los tres o cuatro días, siendo normalmente más corto), que en el largo periodo que transcurre entre dos eventos torrenciales consecutivos. Por tanto, ante la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, cabe plantear las siguientes preguntas:

1. ¿Influyen las superficies de bosque en el origen de las precipitaciones?, dicho de otro modo, ¿Pueden las grandes superficies arboladas modificar el microclima de una región?
2. ¿Interviene el bosque en la dinámica de la formación de las avenidas?; ¿En que medida puede contribuir el bosque a amortiguar las inundaciones?

3. ¿Qué efectos ocasiona el bosque en el control de los procesos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca vertiente, por causa de los eventos torrenciales o por la repentina fusión del manto de nieve que tienen lugar en ella?
4. ¿Cuál es la repercusión de las cubiertas arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales consecutivos?
5. ¿Qué cuestiones se deben plantear en las repoblaciones que se efectúan en las cuencas hidrográficas, con la finalidad de protegerlas de los efectos del fenómeno del geo-dinamismo torrencial que pueden causarles los aguaceros?

Antes de responder a dichas preguntas, se estima oportuno enumerar determinados aspectos intrínsecos, tanto del agua como del bosque, de los que no se puede prescindir en un análisis serio de sus interrelaciones:

1. El agua como elemento cumple con la ecuación de continuidad (conservación de la masa) y en la práctica no se puede entender el ciclo del agua de un modo atemporal, sino ligado al periodo concreto que se analiza, que puede ser tanto húmedo como seco. Además, en su recorrido por la cuenca vertiente, el agua cumple también con la ecuación de la dinámica (verifica la ley de la conservación de la cantidad de movimiento y la ley de conservación de la energía).
2. El bosque es un elemento vivo, que existe de forma natural y estable únicamente donde se

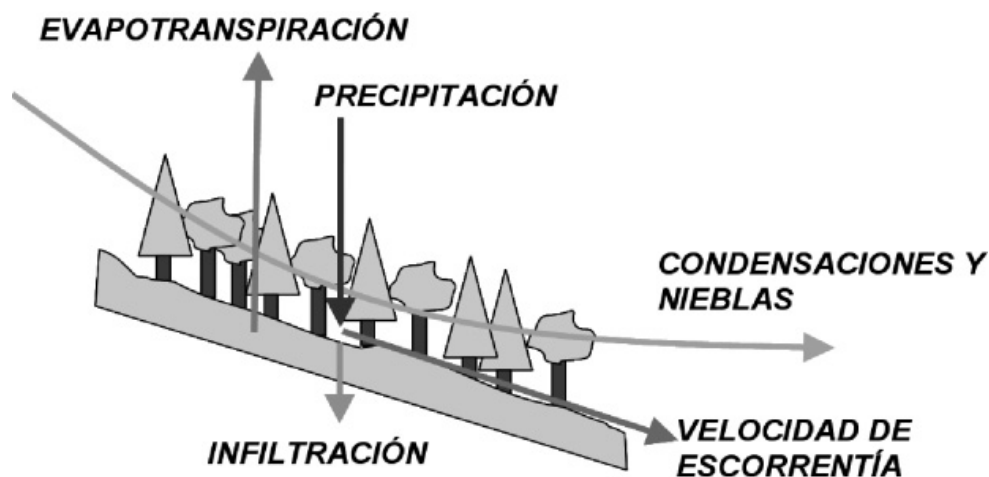


Figura 1. Incidencia del bosque en el ciclo del agua

dan las condiciones climáticas y edáficas que le permiten instalarse, adquiriendo en función de ellas un tipo específico de formación (sea de coníferas, de frondosas o mixto), que trata de alcanzar la vegetación climática. Ésta se puede considerar como la que mejor aprovecha la energía que le proporciona la naturaleza para ubicarse en dicho lugar. Tiende por tanto a un equilibrio, o pseudo-equilibrio cuando no se alcanza aquel; cuya alteración supone una liberación de energía, que puede causar una modificación de las condiciones medioambientales, que no siempre resulta reversible, o al menos a corto plazo.

Todas las preguntas anteriormente formuladas, salvo la primera, están orientadas a la utilización del bosque ante situaciones espacio temporales concretas, que se asocian con las necesidades de la población que habita en la cuenca para las mismas situaciones, es decir, con la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente; cuyos objetivos y contenido sobrepasan de la mera dinámica del ciclo del agua en la cuenca; aunque en este documento se intentará ajustar al significado físico de dichas preguntas.

LA INTERRELACIÓN CLIMA BOSQUE

Se trata de responder a la siguiente pregunta: *¿Contribuye el bosque a incrementar las precipitaciones?* o, dicho de otro modo, *¿Pueden las grandes superficies arboladas modificar el microclima de una región?*

Diferenciando las precipitaciones entre verticales y horizontales. Las *precipitaciones verticales* se clasifican por su origen en *ciclónicas*, *convectivas* y *orográficas*. No parece razonable que los bosques influyan en las precipitaciones *ciclónicas*. Algunos investigadores han interpretado que los bosques pueden contribuir a incrementar las precipitaciones *convectivas*, dado que emiten importantes cantidades de agua a la atmósfera por transpiración; pero, como señaló PENMAN (1963), para que tengan lugar las precipitaciones no es suficiente con la existencia de una masa de agua en la atmósfera, sino que también se deben dar las condiciones propicias para su condensación (*Symposium sobre Hidrología Forestal de la Universidad de Pensylvania*,

1965), por lo que la influencia del bosque en este tipo de precipitaciones resulta en cualquier caso condicionada a situaciones específicas locales. En cuanto a las precipitaciones *orográficas*, los bosques pueden incidir de dos maneras: *a)* aumentando la altura efectiva y en consecuencia los desniveles que han de remontar los vientos cargados de humedad, *b)* por el efecto de fricción que ejercen sobre la velocidad del viento húmedo, este último efecto también se produce en los bosques de llanura; por lo que para algunos científicos como PAVARI (1941) o KITTREDGE (1948) el bosque puede incrementar las precipitaciones orográficas hasta un máximo del 3%.

Para Shirokih el bosque influya en las *precipitaciones ocultas*, que consisten en la fijación en el interior del suelo de vapor de aire atmosférico, cuando la temperatura del suelo está más baja que la temperatura del aire, citado por MOLCHANOV (1960), o que favorezca las condensaciones debidas a *rocíos* y *escarchas*, que suponen también un incremento de agua en el suelo; pero estos efectos, salvo para determinadas situaciones locales, presentan en general escasa relevancia.

Los únicos bosques que tienen una influencia decisiva en el incremento recursos hídricos de la cuenca vertiente, son los conocidos como bosques nubosos que contribuyen con su porte aéreo a la formación de las *precipitaciones horizontales* o *nieblas*, característicos de determinadas áreas tropicales, como en Centroamérica o Asia oriental BRUIJNZEEL et al. (2005), pero que se dan también en otras partes del mundo donde los vientos oceánicos cargados de humedad penetran tierra adentro, como en las Islas Canarias (CEBALLOS Y ORTUÑO, 1952) o en la franja costera de Oregon (INGWERSEN, 1985).

A las grandes regiones climáticas del mundo se les asocia con sus correspondientes vegetaciones climáticas, lo que evidencia que el bosque natural existe donde el clima le permite. Sin embargo, cuando este concepto se particulariza para un lugar concreto, el análisis de la situación hay que plantearlo de forma específica para el mismo; pues éste se encontrará, en el momento que se analiza, en una determinada fase de su serie evolutiva hacia el climax. Este aspecto es esencial cuando se plantean repoblaciones forestales como medio para restaurar las cuencas vertientes degra-

dadas; porque el bosque no sólo requiere de unas condiciones climáticas o pseudoclimáticas favorables, sino también que el medio mantenga la capacidad necesaria para su recuperación.

EL BOSQUE EN LA ATENUACIÓN DE LAS AVENIDAS Y DE LAS INUNDACIONES

- ¿Interviene el bosque en la dinámica de la formación de las avenidas?
- ¿En qué medida puede contribuir el bosque a atenuar las inundaciones?

En la génesis de toda inundación siempre existe un proceso torrencial, que se inicia con un

aguacero o con la fusión repentina del manto de nieve. No existe una relación lineal entre la magnitud de la precipitación y la magnitud del caudal de avenida generado por ella (que se representa por un hidrograma o gráfico que correlaciona los caudales con su tiempo de paso), sino que depende de manera muy importante de la duración y forma de los aguaceros. La simulación de este fenómeno requiere conocer el hietograma (o gráfico que establece la distribución temporal de la precipitación). A partir de esta precipitación se efectúa la estimación de la escorrentía superficial (que se conoce también como precipitación efectiva o neta), para concluir con la generación del hidrograma del aguacero (Figuras 2 y 3).

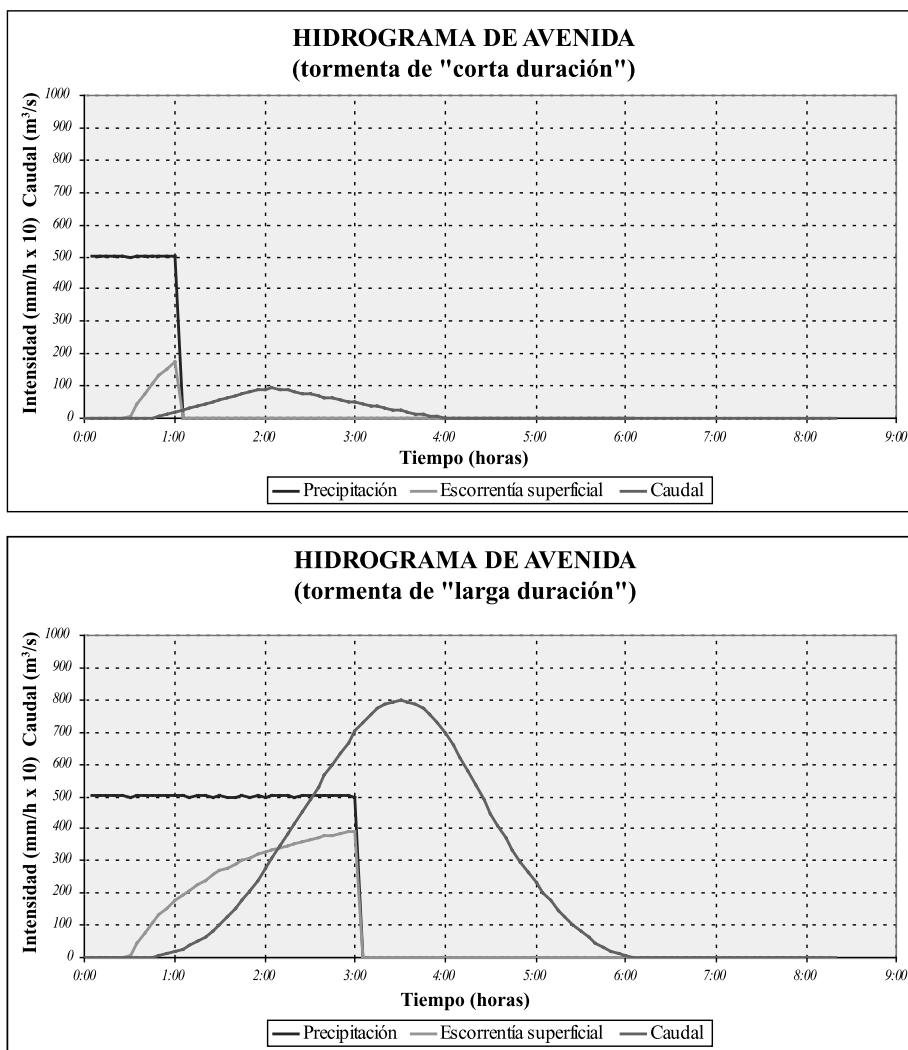


Figura 2. Generación del hidrograma de aguacero. En el gráfico inferior se observa que conforme aumenta la duración de la precipitación disminuye la capacidad de infiltración del suelo, aumentando con ello la precipitación neta y el caudal punta del aguacero

En el tránsito entre la precipitación y la escorrentía superficial, principal generadora del hidrograma de avenida, intervienen las características de la cuenca vertiente, entre ellas el uso del suelo o tipo de vegetación que sustenta. Por tanto, la vegetación y por ende el bosque (que es el estado más desarrollado de la vegetación) influye en la generación de las inundaciones; al incidir en la formación de las escorrentías y condicionar con ello la generación de los caudales de avenida, que en último término, dependiendo del tipo de tormenta que se trate y de las características hidráulicas del cauce, pueden llegar a causar las inundaciones.

Luego, si es posible modificar el uso del suelo en la cuenca vertiente, también lo es el influir en las avenidas y en consecuencia en las inundaciones; la cuestión radica en la medida en la que se consigue influir, tanto para el caso de las avenidas como para el de las inundaciones.

La experiencia demuestra que tratándose de precipitaciones moderadas o de eventos torrenciales ordinarios, el bosque reduce significativamente tanto el volumen de escorrentía como el pico de avenida en el hidrograma de tormenta; pero para eventos torrenciales extremos, aunque la reducción sea consecuencia del mismo proceso físico que el que tiene lugar con los restantes tipos de precipitaciones, su efecto puede no ser lo suficiente como para modificar sustancialmente los caudales de avenida y, por tanto, no condicionar en la práctica el resultado final de las inundaciones.

En este contexto, cuando la capacidad de retención de agua del bosque (tanto en su cubierta aérea como en su suelo) se satura, el retardo en la curva descendente del hidrograma de tormenta tiende a desaparecer y, tras alcanzar el hidrograma su caudal punta de avenida, éste tiende a perpetuarse, atenuándose únicamente por el efecto del tránsito de la avenida. En la práctica esta situación se presenta ante la ocurrencia de precipitaciones torrenciales extremas y requiere además que el evento presente una cierta duración, tanto mayor cuanto mayor sea la superficie de la cuenca hidrográfica (aunque en la última fase no es necesario que continúe manteniéndose el régimen torrencial). En consecuencia: *A medida que aumenta la magnitud de una precipitación extrema, generadora del caudal de avenida, los posibles efectos del bosque en la atenuación de la avenida son cada vez menos revelantes* (Figura 3).

Otra cuestión a considerar es la repercusión que tiene la superficie de la cuenca vertiente en la generación de los hidrogramas. Analizando a éstos, por mera lógica se pone en evidencia que para secciones del cauce que abarcan grandes cuencas vertientes, que comprenden superficies muy extensas (>100.000 Km²), los bosques tienen una influencia muy reducida o prácticamente nula en la atenuación de las grandes avenidas y, en consecuencia, sobre las inundaciones causadas por las precipitaciones extremas. Pero para que esta hipótesis sea formalmente válida,

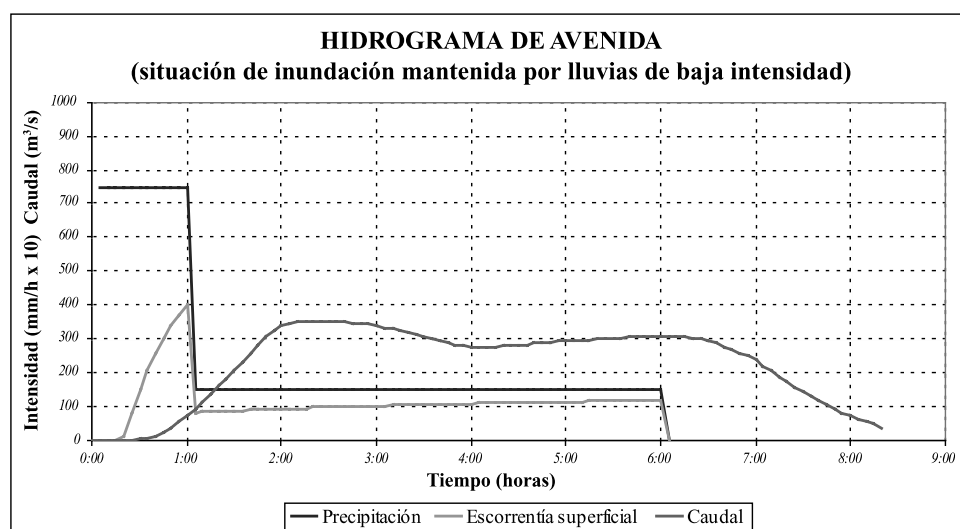


Figura 3. Hidrograma de un aguacero de tormenta, para una situación de inundación

se deben cumplir además dos premisas: 1) que la precipitación extrema tenga lugar a la vez en toda la cuenca o al menos sobre una superficie importante de la misma, lo que normalmente no es muy probable, pero puede ocurrir tratándose de ciclones o huracanes; 2) que realmente exista una proporción significativa de bosque en dicha cuenca (para que se pueda asegurar que éste influye), lo que salvo situaciones muy particulares tampoco es frecuente.

En consecuencia, resulta lógico admitir que en grandes cuencas hidrográficas el efecto de los bosques en la atenuación de las avenidas presenta serias limitaciones ante precipitaciones torrenciales extremas, cuando éstas abarcan superficies importantes dentro de la cuenca y se prolongan en el tiempo.

Pero la situación puede ser diferente tratándose de secciones del cauce que abarquen cuencas pequeñas (<100 Km²), pues en ellas el tiempo de concentración de la avenida t_c (es decir, el tiempo que tarda la escorrentía superficial que se pone en movimiento en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca, en llegar a la sección de salida de la misma) está limitado por las características morfológicas de la cuenca, lo que a su vez reduce al tiempo punta del hidrograma de avenida, condicionando a que el caudal punta del hidrograma presente dos limitaciones: 1) la que se deriva de la propia morfología de la cuenca y 2) la que resulta, en el caso de existencia del bosque, de la reducción aplicada a la precipitación para convertirla en escorrentía superficial.

Las conclusiones del desarrollo lógico de la evolución de las inundaciones que se acaba de exponer, siguiendo los principios de la Hidrología Analítica, coinciden en lo esencial con los resultados de numerosas experiencias realizadas en cuencas comparadas por diversos investigadores citados por ANDRÉASSIAN (2004) o por BRUIJNZEEL et al. (2005) y con las investigaciones de estos mismos autores. Es cierto que el bosque interviene en la generación de las avenidas, pues aumenta la infiltración del agua en el suelo y retiene agua en las copas de los árboles por intercepción; pero cuando las precipitaciones son muy intensas y prolongadas, el suelo y las copas se saturan y el efecto de las superficies arboladas de la cuenca en la atenuación de los

volúmenes de escorrentía y de los caudales punta de avenida no es apreciable, o resulta del mismo orden de magnitud que la falta de certeza en la medición de la propia descarga; en esos momentos ocurren las inundaciones.

Pero no se debe olvidar que en las cuencas hidrográficas, cualquiera que sea su tamaño, ocurren multitud de eventos torrenciales ordinarios, para los que el bosque tiene efectos beneficiosos; regulando eficientemente las escorrentías superficiales y transmitiendo sus efectos finales hasta la atenuación de las avenidas y, sobre todo, que estos eventos torrenciales ordinarios son mucho más frecuentes que los extremos.

EL BOSQUE EN EL CONTROL DE LOS PROCESOS GEO-TORRENCIALES QUE SE DESENCADENAN EN LA CUENCA VERTIENTE, POR CAUSA DE LOS EVENTOS TORRENCIALES O POR LA REPENTINA FUSIÓN DEL MANTO DE NIEVE

Cuando en una cuenca vertiente tienen lugar eventos torrenciales, sobre todo cuando éstos son extraordinarios, no sólo se intensifica en ella el ciclo del agua (los caudales líquidos), sino que se moviliza también el ciclo de los sedimentos actuando simultáneamente con el ciclo del agua y ambos desencadenan el fenómeno conocido como *geo-dinamismo torrencial*. Por tanto, se trata analizar la incidencia del bosque ante este fenómeno, que se inicia con la erosión en la cuenca vertiente y en sus cauces de drenaje, continúa con el transporte de los materiales erosionados por las escorrentías y por los flujos de avenida y concluye con el depósito de los sedimentos transportados, cuando la corriente pierde energía y, por tanto, capacidad para transportarlos. Los fenómenos del geo-dinamismo torrencial se intensifican cuando son provocados por eventos torrenciales extremos, afectando a la estabilidad de los terrenos de la cuenca y en la seguridad de sus habitantes y sus bienes.

Por tanto, los efectos del bosque en relación con las avenidas y las inundaciones, no se reducen únicamente a una moderación en el volumen de escorrentía y en el pico de la avenida generados por el evento torrencial; sino que incide

también en el control de la erosión del suelo en la cuenca, lo que repercute en la reducción de la carga sólida en suspensión que transportan los cursos que drenan por la misma, y en la disminución de la tensión cortante de la corriente que circula por ellos, lo que se puede traducir en una reducción del transporte sólido de fondo. Estos últimos aspectos pueden resultar tan importantes o más que la propia atenuación del caudal líquido de avenida, especialmente en cuencas torrenciales de montaña.

El suelo forestal resta energía cinética al movimiento superficial del agua sobre el terreno, al presentarle una mayor rugosidad para su circulación; asimismo los suelos forestales tienen una mayor porosidad que los agrícolas, lo que contribuye a una mayor retención del agua por infiltración. Por ambas razones, el agua dispone dentro del bosque de una menor capacidad para disgregar y transportar las partículas de suelo, en definitiva de erosionar el suelo. Finalmente, el bosque también aporta un efecto de colchón protector al suelo ante el impacto de las gotas de lluvia.

En relación con la última cuestión, investigaciones recientes han puesto su atención en que el bosque puede contribuir a incrementar el volumen de la gota de agua que llega al suelo, con el consiguiente aumento lineal de su energía de impacto sobre el mismo; pero cabe advertir que en los bosques naturales (no alterados ni por el sobre-pastoreo ni por los aprovechamientos o talas abusivos) el efecto, que pudiera producirse por esta causa, se atenúa por la capacidad amortiguadora que ofrece el colchón de humus y hojarasca que se presenta en los perfiles edáficos superiores de los suelos arbolados. Por tanto, si se quiere conservar la capacidad del bosque para proteger al suelo de la erosión hídrica, es necesario conservar su estructura tanto edáfica como de su parte aérea.

Al igual que ocurre con los caudales líquidos, el área de la cuenca vertiente representa un factor esencial en la manera en la que en ella se desencadena el fenómeno del geo-dinamismo torrencial, diferenciando sustancialmente según se trate de pequeñas cuencas de montaña o de grandes cuencas fluviales. En las primeras, todas las fases el geo-dinamismo torrencial se manifiestan, o al menos se pueden manifestar, en un

espacio limitado y en un corto periodo de tiempo, lo que le hace muy agresivo, además de presentarse con una recurrencia reducida (períodos de retorno entre 10 y 25 años); mientras que en las segundas los distintos procesos del geo-dinamismo torrencial (erosión, transporte y sedimentación) se manifiestan mejor diferenciados espacial y temporalmente y el geo-dinamismo torrencial, como una realidad conjunta, se presenta únicamente con ocasión de eventos torrenciales extremos y con periodos de recurrencia normalmente muy prolongados. Ante estas circunstancias, es lógico que la función protectora que realiza el bosque, generalizando cualquier cubierta vegetal, resulta muy diferente dependiendo del tipo de cuenca que se considere.

Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial desencadenado en las pequeñas cuencas de montaña

Desde los tiempos de los primeros ingenieros correctores de las cuencas vertientes a los torrentes de montaña en la Europa del siglo XIX, el principal efecto que se le ha atribuido al bosque, es su capacidad de sujeción y estabilización del suelo en las laderas con fuertes pendientes ante las escorrentías superficiales; contribuyendo con ello a disminuir también la descarga sólida que llega a los torrentes. Por ello se justifica la repoblación forestal de estas cuencas vertientes y, en las laderas que no es factible asentar la repoblación, la práctica de *faginadas* y *palizadas* (estructuras vegetales leñosas flexibles, normalmente del género *Salix* sp., que se instalaban en el suelo siguiendo curvas de nivel para que, tras enraizar y rebrotar, aumenten la resistencia del terreno a la tensión de corte de la lámina de escurrido). Se trata de trabajos selvícolas, cuya finalidad es la de estabilizar las laderas. Lo que queda claro de estas operaciones, es que se prefiere la vegetación leñosa frente a la no lignificada y dentro de la leñosa al arbolado. Además, la repoblación forestal de las cuencas de montaña ha servido también para asegurar el mantenimiento y la efectividad a lo largo del tiempo de los trabajos de corrección hidráulica realizados en los torrentes.

Esta filosofía se mantiene a pesar de que en las últimas décadas se ha cuestionado en alguna ocasión el modo de realizar ciertas obras y tam-

bién se ha planteado, en los casos que resulta viable, la conveniencia de adecuar la corrección de los torrentes a criterios de reconstrucción geo-morfológica y a la adecuación paisajística del entorno LENZI et al. (2000), pero siempre y cuando la seguridad de las obras quede debidamente garantizada y los objetivos a proteger estén perfectamente cubiertos.

Tratándose de las cabeceras de las cuencas vertientes de alta montaña tropical en América Latina, conviene señalar que cuando en ellas se conserva el pajonal del páramo en buenas condiciones sobre andosoles de gran capacidad higroscópica; éste desempeña en dichas cuencas una protección similar a la que ejercen las repoblaciones protectoras efectuadas en el pasado en Europa en las cabeceras de las cuencas de montaña; con la ventaja que no requiere de mantenimiento, mientras se conserve inalterado; lo que no ocurre con las repoblaciones, que al ser casi siempre coetáneas, necesitan de trabajos selvícolas, para asegurar su persistencia.

Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial que se manifiesta en las grandes cuencas fluviales

El geo-dinamismo torrencial no es ajeno a las grandes cuencas fluviales, pero sólo en circunstancias muy especiales, que coinciden con precipitaciones torrenciales extremas que afectan a una gran parte de la cuenca (lo que únicamente es previsible para largos periodos de retorno), sus efectos presentan la misma dinámica que en las pequeñas cuencas de montaña. Cuando esto ocurre, se trata de situaciones que pueden clasificarse de desastre, cuando no de catástrofe.

En las restantes situaciones, aunque en el campo de la investigación se plantee el estudio conjunto de todos los procesos que integran el geo-dinamismo torrencial aplicando modelos hidrológicos; en la práctica agronómica es frecuente analizar los diferentes procesos por separado; pues es obvio que en las grandes cuencas existen superficies que, por sus características fisiográficas, son aptas para cultivos o pastizales, a los que naturalmente se dedican; aunque existan también superficies que por sus pendientes elevadas y características edáficas conviene mantenerlas con cubiertas permanentes arboladas, para controlar con ellas los procesos geo-

torrenciales que se pueden generar. Por tanto, los distintos efectos geo-torrenciales se manifiestan de manera diferenciada en las distintas partes de la cuenca y en consecuencia se abordan también de un modo particular en cada una de ellas.

En este contexto, tiene sentido analizar de un modo específico los problemas causados por la erosión hídrica en cultivos y pastizales, cuando afectan a extensas superficies cuya productividad e incluso su propia existencia como sistemas productivos resulta amenazado. Estos planteamientos tienen especial repercusión en las medidas de conservación de suelos en dichas áreas, aspecto que se relaciona directamente con los sistemas agronómicos sustentables, cuyo antecedente moderno se puede situar en la *Clasificación Agrológica de Suelos* de BENNETT (1939), que en el transcurso de los años se ha ido adaptando a los condicionantes de las nuevas técnicas agronómicas y a las particularidades de los distintos países en los que se ha ido introduciendo. En la actualidad su implantación resulta prácticamente universal. El USDA Soil Conservation Service, desde su creación en 1935, ha contribuido sustancialmente en el estudio de la erosión hídrica del suelo y en la adopción de medidas para su control. En su ámbito WISCHMEIER (1959, 1960, 1974) y WISCHMEIER & SMITH (1978) desarrollaron el modelo paramétrico USLE (Universal Soil Loss Equation - Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo-) para estimar la erosión potencial del suelo (en t·ha⁻¹). Una modificación de la USLE planteada por WILLIAMS (1975), permitió establecer el modelo MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation -Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada) para estimar los sedimentos emitidos por una cuenca vertiente (t) durante un aguacero concreto. Por último, a partir de RENARD et al. (1991) se ha desarrollado el modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation* -Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada-), que manteniendo la estructura inicial del modelo USLE, mejora la determinación de las pérdidas de suelo, gracias a una mayor precisión en la definición de los parámetros que lo integran para la situación objeto de análisis. Bajo el punto de vista agronómico la RUSLE tiene notables prestaciones, pero su aplicación se reduce en la práctica a fincas o a

situaciones en las que se dispone de una buena información pluviométrica, edáfica y de la cubierta vegetal.

Ante esta situación: *¿dónde y cuando es necesario mantener el bosque, en las grandes cuencas hidrográficas?*. Antes de responder a esta pregunta, se recuerda que el bosque, especialmente el *bosque climácico*, es la formación vegetal más estable en la estación donde se ubica, es decir, es la que mejor aprovecha la energía que le proporciona la naturaleza para ubicarse en dicho lugar y en consecuencia la que mejor protege al suelo ante el geo-dinamismo torrencial. (Es importante señalar que lo dicho no implica que el bosque sea la única formación estable, sino que el bosque es estable donde las condiciones climáticas lo condicionan; en climas muy fríos de montaña también pueden ser estables otras formaciones no arbóreas). En consecuencia, si la alteración de ese estado natural no supone la aparición de problemas geo-torrenciales en la cuenca ante la incidencia en ella de eventos torrenciales, porque la energía que queda *liberada* resulta fácilmente controlable, cuando no aprovechable; como ocurre, por ejemplo, en la sustitución de los bosques de llanura por pastizales; la cuestión bajo el punto de vista de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca no reviste discusión, se da al suelo el uso que mejor se adapte a las necesidades de la población. Pero si sucede lo contrario, por ejemplo, se trata de un bosque en una ladera de fuerte pendiente ubicada en la cabecera de una cuenca, en la que, en el caso de sustituir el bosque por un pastizal, la energía del agua de escorrentía cause erosión en el suelo e incluso pueda producir deslizamientos superficiales ante aguaceros extraordinarios; la situación debe hacer pensar que, aunque inicialmente el pastizal proporcione una mayor escorrentía en las precipitaciones ordinarias, el peligro de deslizamientos ante precipitaciones extraordinarias, invita a plantear como algo muy razonable la conservación del bosque en el paraje en cuestión.

En la España de los años cincuenta del siglo pasado, ante el avance de la erosión del suelo en los terrenos cultivados con escasa capacidad agronómica para tales usos, se planteó definir unos criterios de adecuación de los cultivos y pastizales en el territorio, reservando las áreas

más vulnerables a la erosión hídrica a la vegetación permanente, especialmente la arbolada. En este escenario GARCÍA NÁJERA estableció y publicó su *Ecuación de la pendiente máxima admisible en cultivos* (1954) y *pastizales* (1955). En síntesis el autor (tras cálculos analíticos y ensayos en un canal de laboratorio) propuso lo siguiente: Definió para los cultivos dos pendientes críticas a las que denominó: *pendiente de iniciación de la erosión* (para la que estableció un valor entre el 7 y 8%) y *pendiente de arrastre total* (que lo determinó en un 18%); mientras que para los pastizales sus cálculos puramente analíticos le llevaron a establecer que, para asegurar su conservación en buenas condiciones *no debían extenderse en terrenos con más del 30% de pendiente*. Aunque fueran estudios analíticos, únicamente ensayados en un canal de laboratorio, resultaban coincidentes con las recomendaciones de Bennett.

Basándose en dichos trabajos y en las recomendaciones de la FAO, LÓPEZ CADENAS DE LLANO & BLANCO CRIADO (1968) establecieron los *índices de protección del suelo por la vegetación*, ampliando el valor de la *pendiente de iniciación de la erosión* hasta el 12%. Implícitamente estos índices se utilizaron durante mucho tiempo en España, como un criterio para establecer las zonas prioritarias para la repoblación forestal en las cuencas vertientes necesitadas de restauración hidrológico-forestal. Dichos índices presentan valores relativos, que van desde 1,0 (máxima protección) a 0,0 (protección nula) y se corresponden para cada tipo de suelo diferenciado dentro de la cuenca. Para los autores, su utilización se centra en las siguientes propuestas: 1) Mientras el terreno no supere la pendiente del 12% (*pendiente de iniciación de la erosión*), se trata de suelos agrícolas, sujetos únicamente a las buenas prácticas de cultivo y a la conservación de su productividad. 2) A partir del 12% de pendiente y hasta alcanzar la pendiente de arrastre total (que dependiendo de los tipos de suelo varía entre el 18% y el 24% de pendiente) los suelos siguen manteniendo su vocación agrícola, pero necesitan de prácticas importantes de conservación de suelos para controlar en ellos la erosión hídrica; que también podría ser regulada dedicándolos a pastizales. 3) Los pastizales bien conservados aseguran

una buena protección al suelo frente a la erosión hídrica hasta el 30% de pendiente, disminuyendo a partir de este valor conforme aumenta el gradiente del terreno y 4) A partir del 30% de pendiente la única opción que garantiza la correcta protección del suelo ante la erosión hídrica es una cubierta vegetal lignificada, de matorral denso y cubriendo totalmente el suelo y como opción preferible el bosque. A partir de 1975 se generalizó el uso del modelo USLE en España, siendo uno de sus mayores impulsores el Profesor Filiberto López Cadenas de Llano.

Se completa este epígrafe comentando algunas cuestiones en relación con la vegetación de riberas. Su uso es normalmente conveniente: a) porque evita un importante aporte de sedimentos directos al cauce procedentes de sus vertientes laterales directas y b) incrementa la resistencia de los márgenes del cauce a la abrasión producida por la tensión tractiva de la corriente en avenidas ordinarias. Ambos efectos contribuyen a la protección del cauce y a mejorar la calidad de las aguas. Lógicamente la vegetación de riberas, como cualquier otra, tiene su consumo de agua; pero sus efectos beneficiosos ante avenidas torrenciales ordinarias compensan su mantenimiento. En caso de avenidas torrenciales extraordinarias, sus efectos positivos se limitan y es preciso prever los problemas que pueda generar, debido tanto al mayor calado que adoptarían los caudales circulantes como consecuencia de la mayor rugosidad del cauce, como por el hecho de que la corriente lo arranque y a continuación lo arrastre aguas abajo; por lo que conviene controlarla, manteniendo especies de raíces pivotantes que presenten una buena sujeción al terreno y atendiendo a la edad y al estado sanitario de la vegetación, para evitar posibles taponamientos en secciones del cauce aguas abajo, en las que se podrían acumular los residuos vegetales, sobre todo los que tienen tañamos apreciables. Al respecto se remite al lector al documento D22 del Proyecto EPIC FORCE El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce (LENZI et al., 2007).

Los efectos del bosque en el control de los fenómenos nivales

El bosque de montaña, hasta la altitud a la que consigue instalarse por las limitaciones que le imponen las condiciones climáticas y edáfi-

cas, desempeña un papel hidrológico y de protección del suelo en la cuenca vertiente de primer orden; pero además contribuye de varias formas a la estabilidad del manto de nieve, disminuyendo con ello el riesgo de desprendimiento de aludes. Los aludes sobrevienen cuando, debido a una inestabilidad local, se produce una rotura en el equilibrio del manto de nieve en la montaña, desencadenando un deslizamiento ladera abajo de grandes masas de nieve en ocasiones a velocidades muy elevadas.

El bosque de montaña contribuye de varias formas a la estabilidad del manto de nieve:

- a) Sus troncos constituyen excelentes puntos de anclaje al terreno que frenan la reptación de la nieve.
- b) En el momento de la nevada, sobre todo en los bosques de hoja perenne, las copas conservan una gran parte de la nieve, que solamente cae después de empezar la metamorfosis destructiva.
- c) La cubierta forestal atenúa los efectos del enfriamiento, lo que conduce a una metamorfosis más rápida que en el terreno al descubierto.

En relación con el apartado anterior c) el bosque genera un microclima en su interior, de este modo las temperaturas dentro del mismo pueden ser superiores a las del exterior durante el invierno y viceversa durante el verano, lo que afecta a la metamorfosis del manto de nieve retenido dentro de él (es decir, en las transformaciones internas que experimentan los cristales de las distintas capas que forman el manto de nieve durante el invierno, debido a las variaciones de los gradientes de temperatura que experimenta dicho manto de nieve a lo largo del mismo y a la incorporación de agua líquida al inicio del periodo de fusión en primavera).

El bosque impide el desprendimiento de aludes, por tanto se le considera una medida de protección activa frente a su riesgo; pero es incapaz de frenarlos una vez que se han desprendido.

Para altitudes superiores al bosque, en los pastizales de montaña la primera nieve se adhiere mejor al terreno, si el ganado ha pastado ya en ellos; porque la hierba rasa hace el efecto de *alfombra cepillo*, mientras que las hierbas largas se inclinan bajo el peso de la nieve y ofrecen una superficie lisa favorable al deslizamiento. En los

matorrales de montaña la nieve penetra entre los numerosos huecos que presenta su estructura vegetal, lo que impide que se forme una buena adherencia de la nieve al terreno y de las capas del manto de nieve entre sí, favoreciendo con ello su deslizamiento.

LA REPERCUSIÓN DE LAS CUBIERTAS ARBOLADAS EN LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DE LA CUENCA VERTIENTE EN LOS PERIODOS QUE TRANSCURREN ENTRE EVENTOS TORRENCIALES CONSECUTIVOS

En el panorama actual diversos investigadores CALDER (1998, 1999), BRUIJNZEEL (2004), BRUIJNZEEL et al. (2005), HUBER & IROUME (2001), IROUME & HUBER (2002), entre otros, han constatado que la transformación de extensas superficies de una cuenca vertiente de desarboladas a arboladas o viceversa, modifica el estado de las disponibilidades de agua en las diferentes áreas de ésta. Este aspecto tiene especial interés en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, pues condiciona el posible aprovechamiento del recurso agua por sus pobladores.

Para iniciar este análisis, se recurre a los resultados obtenidos de las experiencias realizadas en *cuenclas comparadas*. Se adopta el planteamiento descrito por ADRÉASSIAN (2004), quién al presentar sus propios resultados, se apoyó en los trabajos realizados por otros investigadores, entre ellos en los de BOSCH & HEWLETT (1982) y COSANDEY (1995).

El principio de las cuencas comparadas se basa en seleccionar dos cuencas vertientes tan similares como resulte posible, lo que permite suponer que ambas tendrán una reacción similar ante las incidencias climáticas; pero inevitablemente cada cuenca presenta sus propias peculiaridades, por lo que se requiere monitorizar ambas durante un determinado periodo para entender sus diferencias. Hipotéticamente el periodo preliminar de calibración debe ser lo suficientemente prolongado para conseguir una caracterización completa de ambas cuencas. Al final del periodo de calibración se modifica el uso del suelo en una de las cuencas (*cuencla de tratamiento*), perma-

neciendo inalterable en la otra (*cuencla de control*). La relación entre las cuencas antes del tratamiento se utiliza para reconstruir el flujo de los cursos en la cuenca tratada, lo que permite valorar el impacto del tratamiento en mm de precipitación o en $m^3 \cdot s^{-1}$ de flujo.

Las hipótesis del diseño experimental son: a) Las dos cuencas deben ser muy similares y con un comportamiento muy parecido. b) Ambas cuencas deben estar próximas geográficamente, para asegurarse que están sujetas a las mismas variaciones climáticas. c) La *cuencla de referencia* debe permanecer inalterada en todo el periodo de estudio. De este modo se aporta a las experiencias una *invariabilidad entre cuencas* y una *invariabilidad del clima*.

El efecto de la deforestación en una cuenca vertiente

ADRÉASSIAN (2004) manteniendo la presentación adoptada por BOSCH & HEWLETT (1982) en sus experiencias, agregó a éstas los resultados publicados en los 20 años posteriores, llegando a considerar un total de 137 experimentos en cuencas comparadas; 115 relativas a la deforestación y 22 a la reforestación. Los resultados se muestran en la Figura 4.

En la Figura 4 resulta obvio que la deforestación aumenta las escorrentías (interpretado como volumen de agua disponible y también denominado cosecha de agua), mientras que la repoblación lo disminuye; pero también se observa que los resultados son extremadamente dispersos y parece conveniente señalar que el análisis no hace referencia a lluvias torrenciales, ni contempla los efectos geo-torrenciales.

Por otra parte, ADRÉASSIAN (2004) observó que en la Figura 4 se planteaban dos cuestiones: 1) Resulta difícil interpretar el verdadero sentido de la máxima variación anual, ya que depende del volumen de precipitación anual en los años posteriores al tratamiento y 2) El impacto del tratamiento no es estable en el tiempo para la mayor parte de las experiencias en cuencas comparadas. Esta cuestión fue detectada también por HIBBERT et al. (1975) y para mejorar la interpretación del impacto del tratamiento propusieron comparar la relación precipitación escorrentía antes y después del tratamiento, como se muestra en la Figura 5.

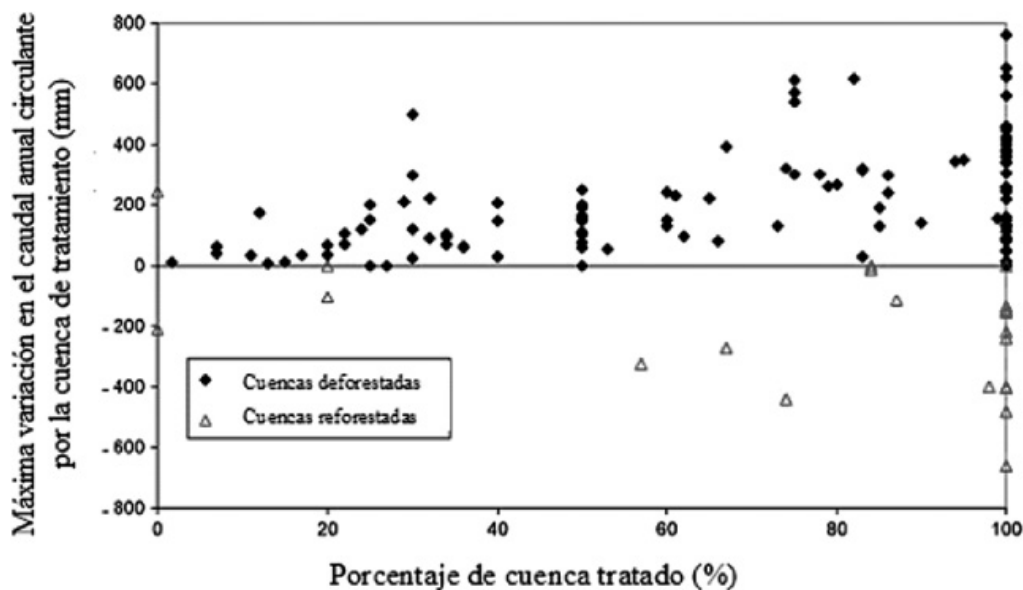


Figura 4. Máxima variación anual de la escorrentía (mm) en función del porcentaje de la cuenca sujeta a tratamiento siguiendo a BOSCH & HEWLETT (1982 y ADREASSIAN (2004)

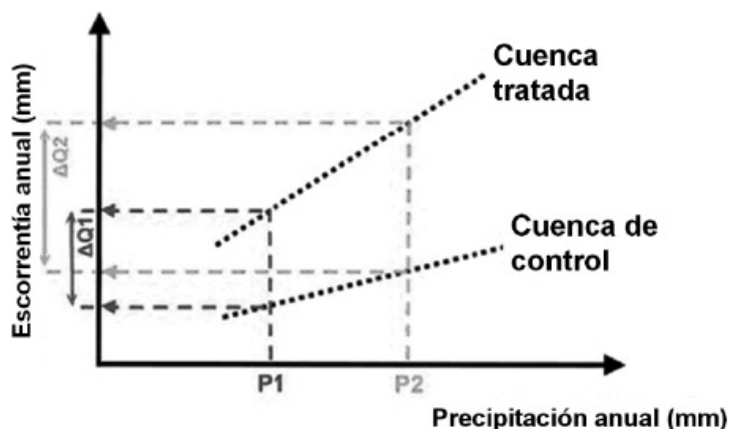


Figura 5. Variación de la relación precipitación/escorrentía entre una cuenca tratada y la cuenca de control para la precipitación anual. (Basado en HIBBERT et al. 1975 y ADREASSIAN, 2004)

En cualquier caso, las experiencias en cuencas comparadas evidencian que el bosque no supone una mayor disponibilidad de recursos hídricos de forma inmediata, sino más bien lo contrario; por lo que, si lo que se pretende es disponer a corto plazo de la mayor proporción del volumen de agua recibida en la cuenca a través de las precipitaciones, las formaciones vegetales de menor consumo de agua, como los pastizales, favorecen la escorrentía superficial y con ello su posible almacenamiento y consiguiente aprovechamiento.

Pero conviene señalar que esta opción, que activa el ciclo del agua al favorecer la escorrentía, también activa el ciclo de los sedimentos; por lo que en

situaciones en las que el geo-dinamismo torrencial en la cuenca resulta muy intenso, puede derivar en efectos colaterales, como el de un incremento de la erosión del suelo, que no resultan deseables en la cuenca vertiente, lo que puede justificar la presencia del bosque en ciertas áreas de la misma.

El efecto de la recuperación de la cubierta arbolada en la cuenca vertiente tras su deforestación

Salvo en casos de cuencas degradadas, el bosque tiende a colonizar de nuevo la cuenca que ha sido deforestada, si no se toman las medidas necesarias para impedirlo. A esta conclusión

llegó HIBBERT (1967) tras observar el comportamiento hidrológico en varias cuencas experimentales en Coweeta (Estados Unidos), durante el periodo en el que recuperan sus cubiertas vegetales tras su deforestación. Se percató que la única forma de mantener desforestada la cuenca era actuando permanentemente sobre ella, pues de otro modo ésta se volvía a cubrir con la aparición de los sucesivos estadios evolutivos de la vegetación climática. Comprobó que los efectos de la deforestación tenían una duración breve en las cuencas vertientes analizadas, de manera que transcurridos entre 7 y 25 años desde su tratamiento y, según las cuencas, su efecto sobre las escorrentías prácticamente se anulaba. A conclusiones similares llegaron otros investigadores citados por ANDRÉASSIAN (2004).

ANDRÉASSIAN (2004) describió asimismo los trabajos y resultados de varios investigadores en Coshocton, en relación con los efectos de la repoblación forestal en el régimen hidrológico de una cuenca vertiente de carácter agrícola que había sido repoblada; en la que se comprobó que en los primeros años tras la repoblación la reducción de las escorrentías era muy rápida, pero que ésta se estabilizaba a partir de los 10-15 años. El mismo autor utilizando un registro más largo de la misma cuenca, observó que la tendencia se decantaba hacia la estabilización de las escorrentías conforme el arbolado se consolidaba, lo que señalaba que el consumo de agua en los bosques maduros se reduce, hasta establecer un equilibrio con el medio.

Además diversos autores han verificado que los efectos indicados están relacionados con la fisiología de las diferentes especies arbóreas, que alcanzan sus máximos valores de transpiración coincidiendo con sus periodos de mayor crecimiento. Así lo han comprobado, por ejemplo, los hidrólogos australianos VERTESSY et al. (1995, 1997, 2001) y ROBERTS et al. (2001) en las masas de eucaliptos; llegando a establecer que en ellas se alcanza un máximo en la transpiración hacia los 15 años de edad, que se corresponde con su estado de mayor crecimiento. Parece lógico pensar que en especies de crecimiento más lento este pico en la transpiración se retrase en unos años.

Resumiendo, de los resultados de las experiencias efectuadas en *cuencas comparadas*, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. En algunas cuencas vertientes se pueden presentar determinadas circunstancias en las que, ante el incremento de consumo hídrico que supone una cubierta arbolada, se plantee la conveniencia de su sustitución por otra cubierta vegetal de menor porte y consiguiente menor consumo hídrico; especialmente cuando dicho diferencial resulta determinante para otros fines o apremie disponer del mismo en forma de escorrentía y su posterior almacenamiento. Conviene señalar que desde una perspectiva teórica la cuestión no presenta objeciones; pero como se ha indicado, el incremento de las escorrentías implica una activación simultánea de los ciclos del agua y de los sedimentos; por lo que ante precipitaciones torrenciales puede suponer un aumento del riesgo de erosión en el suelo, lo que conviene tenerlo previsto.
2. La información que aportan las *cuencas de tratamiento*, durante el periodo en el que la vegetación arbolada se regenera en las mismas, tiene especial interés; pues muestra que en los 10-20 primeros años de su regeneración, que coincide con su fase de mayor crecimiento, corresponde con los de mayor consumo hídrico. Pero el turno de las especies forestales es más prolongado y, cuando el arbolado alcanza su pleno desarrollo, sus exigencias hídricas se estabilizan dependiendo de su fisiología y de las condiciones de la estación en la que se ubica (definidas por su clima y suelo, es decir, por las *condiciones climáticas o pseudoclimáticas*).
3. Es conocido entre los repobladores que cuando una determinada especie arbórea no se atempera a las condiciones *climáticas* de la estación en la que se implanta, vegeta mal y termina por desaparecer de un modo natural o adopta un porte achaparrado. Los estudios de los fito-climatólogos ponen de manifiesto que cada especie de arbolado tiene unas características culturales que le hacen aptas para determinadas estaciones; lo que en ningún caso quiere decir que la vegetación pueda condicionar el clima, pero sí lo inverso.

Antes de concluir con las aportaciones facilitadas por las *cuencas comparadas*: se comentan también dos aspectos que establecen sus limitaciones: a) La mayor parte de las experien-

cias en cuencas comparadas se refiere a pequeñas cuencas de menos de 2 Km², por tanto, existe un *efecto de escala* de difícil cuantificación. b) El incremento de la escorrentía no se debe interpretar como *cosecha de agua*, traducción directa del inglés *water harvest*, pues una cosecha es el resultado de una producción, que sólo es posible en seres vivos, como son las plantas; el agua verifica la ecuación de continuidad, por tanto se mantiene constante; lo único que puede variar es su forma de aprovechamiento.

Las conclusiones obtenidas a partir de las cuencas comparadas son clarificadoras, pero la relación entre el bosque y las disponibilidades hídricas en la cuenca vertiente es muy compleja y en ella influyen también otros factores, especialmente: a) La ubicación del bosque dentro la cuenca y la situación geográfica y altimétrica de esta última; b) La superficie de la cuenca y sobre todo su estado físico, difiriendo sustancialmente si se trata de cuencas degradadas que se pretenden recuperarlas, o de cuencas en buen estado de conservación y con una alta capacidad productiva. Es difícil disponer de un auténtico modelo de comportamiento de los bosques, salvo que se lleve trabajando un largo período en ellos. La experiencia es fundamental para planificar el futuro de las masas arboladas, por ello es importante la existencia de Servicios Forestales permanentes; pero a modo de ejemplo, se comentan dos situaciones prácticas significativas:

1) Cuando se trata de repoblaciones forestales que abarcan superficies importantes en las cabeceras de cuencas bien conservadas (con abundante suelo), en los años siguientes en los que el repoblado se encuentra en su estado de máximo crecimiento, es previsible que se produzca una alteración del ciclo del agua en la cuenca y, en consecuencia, se experimente una disminución en las disponibilidades de agua en las áreas dominadas, hasta que el ciclo del agua en la cuenca se establezca de nuevo cuando el arbolado se haya consolidado en las áreas dominantes. Evidentemente esta situación no es equiparable a la que presentan las cuencas degradadas, en las que la disponibilidad de suelo y agua en sus cabeceras son muy reducida, por lo que difícilmente pueden secar fuentes aguas abajo.

2) En el caso ya comentado de los bosques de nieblas que ocupan las áreas dominantes de una cuenca vertiente, su tala o desaparición acarrea también problemas por la reducción de agua en las áreas dominadas, al desaparecer el suministro de agua que facilitaba el bosque de cabecera con la condensación de las nieblas en su vuelo.

LA REFORESTACIÓN CON FINES DE RESTAURAR LA CUENCA VERTIENTE Y SU INCIDENCIA EN LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DE LA MISMA

BRUIJNZEEL et al. (2005), remitiéndose a los regiones tropicales, comentan tres creencias relacionadas con las repoblaciones forestales: 1) La reforestación incrementa las precipitaciones. 2) La reforestación devuelve el flujo a los ríos (particularmente en la estación seca). 3) Las especies usadas en la reforestación son todas similares en cuanto a sus efectos (positivos) hidrológicos. Ante ellas, los autores contraponen los resultados obtenidos con la investigación científica: 1) No hay evidencia de que la reforestación incremente las precipitaciones (salvo situaciones de bosques nubosos). 2) A corto plazo (<20 años) la reforestación disminuye la escorrentía directa y el caudal base. 3) Las especies de rápido crecimiento tienden a usar más agua que las de crecimiento lento y los efectos hidrológicos varían proporcionalmente con el área reforestada y con la densidad de la plantación.

Al margen de dichas creencias, en la práctica se ha asumido desde siempre, tanto en la agricultura como en la silvicultura, la necesidad de disponer del agua que permita desarrollar ambas actividades. En el caso de la agricultura se plantea incluso la adición de agua por riego para cubrir dicha necesidad; tratándose de la silvicultura no se recurre al *riego*, pero se extreman las medidas en la *elección de la especie* y en la *preparación del suelo* anterior a la plantación, para optimizar el aprovechamiento de las reservas hídricas del suelo. Las primeras seleccionando las especies que tienen capacidad para atemperarse al medido donde se implantan (que sean climáticas o pseudoclimáticas de estadios

anteriores al clímax): Las segundas para mejorar las condiciones del suelo para retener el agua de las precipitaciones en los años siguientes a la plantación, a fin de que ésta pueda superar las condiciones adversas del medio en dichos años (MINTEGUI et al., 1993)

La cuestión del consumo de agua por las masas arboladas no ha sido debidamente considerada hasta las últimas décadas; porque en las repoblaciones con fines de protección de cuencas ante los eventos torrenciales realizadas en el pasado, se hacía prevaler la protección del suelo frente a la erosión hídrica, supeditando prácticamente todo a este objetivo. Sin embargo, conviene señalar al respecto, que los restauradores de cuencas vertientes en la Europa meridional se toparon en ocasiones con problemas relacionados con la falta de humedad en los suelos a repoblar, a causa del escaso perfil edáfico de éstos; lo que les obligó a mejorar las técnicas de preparación del suelo para asegurar las repoblaciones forestales y lograr superar precisamente las condiciones de precariedad de unos terrenos que eran objeto de reforestación; en los que se pretendía generar suelo forestal, para evitar las escorrentías que estaban degradando las laderas. Las circunstancias expuestas contrastan con las que se presentan en un páramo bien conservado, asentado sobre un andosol profundo, cuya capacidad para retener el agua puede ser elevada; pero podrían parecerse si el páramo se degradara por años de roturaciones y inadecuado uso de sus suelos.

En cualquier caso, conviene matizar que no todas las repoblaciones forestales son iguales: a) ni por sus objetivos, las hay de *protección* de la cuenca ante los eventos torrenciales; de *producción* de madera y/o frutos; o *otros fines*; b) ni por las técnicas empleadas en su implantación en el territorio; c) ni por el consumo de agua y nutrientes de las mismas. A continuación se muestran una serie de características que permiten diferenciar entre las repoblaciones de *producción* y de *protección*:

1. En las repoblaciones productivas, que en ocasiones pueden ser altamente productivas como algunas plantaciones de pinos o eucaliptos en Chile, las condiciones del medio para acoger a la plantación suelen ser favorables e incluso pueden llegar a ser óptimas; en tales circunstancias las características

fisiológicas de la planta a introducir son un factor determinante en la *elección de especie*, porque permite asegurar la producción esperada con la plantación. En algunos casos estas repoblaciones se llegan incluso a abonar y el ciclo productivo es relativamente corto (utilizando el término forestal clásico, se hablaría que el turno de corta está entre 15-30 años). Estas plantaciones presentan similitudes con los cultivos agrícolas y por tanto la corta final (normalmente a hecho o mata-rasa) se identifica con la cosecha y se le denomina de este modo. En este tipo de plantaciones tiene pleno sentido contemplar el balance hídrico de las mismas, para asegurar el rendimiento sustentable de las propias plantaciones; pero, sobre todo, para no desabastecer las necesidades hídricas aguas abajo de su ubicación.

2. Las repoblaciones con fines protectores tratan de controlar la erosión del suelo en la propia superficie que se repuebla y de proteger a la cuenca vertiente, especialmente en sus áreas dominadas o valles, de los efectos que el geo-dinamismo torrencial le pueda causar, cuando en ella ocurren eventos torrenciales, especialmente cuando tales eventos son extraordinarios. Muchas de estas repoblaciones se llevan a cabo en situaciones límites (regiones semiáridas y sobre suelos degradados), extremando las medidas en la elección de especie y en la preparación del suelo previa a la repoblación, para aprovechar el escaso suelo y agua disponibles, con el objetivo de mejorar el futuro de ambos recursos a través la creación de suelo forestal con la repoblación. En estas repoblaciones la elección de especie no se limita a conocer las características fisiológicas de la planta y a asegurarse su perfecto estado sanitario, sino que también hay que considerar la capacidad de la especie para atemperarse al medio en el que se instala (auto-ecología), y la posibilidad de mejorar el suelo para los primeros años de la repoblación, lo que exige un buen conocimiento edafológico del área a repoblar y del comportamiento hidrológico de las técnicas de preparación del terreno para la repoblación. Si la repoblación prospera, lógicamente la masa arbolada

transpira y necesita de recursos hídricos para subsistir, pero al mismo tiempo sus sistemas radicales van generando un suelo forestal, donde anteriormente existía un suelo degradado, y éste permitirá en el futuro un mejor aprovechamiento del agua procedente de las precipitaciones. Masas arboladas con estas características existen, su producción forestal es muy baja, pero su objetivo es constituir una infraestructura de protección de la cuenca ante eventos torrenciales.

CONCLUSIONES FINALES

Siguiendo el esquema de utilizado en una publicación anterior MINTEGUI & ROBREDO (2008), se aportan las conclusiones a modo de aforismos:

1. Los recursos hídricos se localizan dentro del ciclo del agua y resulta demostrable que el bosque, entendido como suelo forestal y cobertura arbolada, incide en dicho ciclo, luego el bosque influye en el ciclo del agua.
2. Salvo que se trate de precipitaciones horizontales o nieblas, características de los bosques nubosos y debidas a la condensación en la cubierta arbórea de la humedad de los vientos oceánicos que penetran tierra adentro; para los restantes tipos de precipitaciones (orográficas, convectivas, ocultas, rocíos y escarchas) la inferencia del bosque no es relevante y, de serlo, se trata de fenómenos localizados. No se ha comprobado que el bosque afecte a las precipitaciones ciclónicas.
3. El efecto del bosque en la atenuación de las avenidas es mayor para los eventos torrenciales ordinarios que para los extraordinarios; así como en las pequeñas cuencas de montaña que en las grandes cuencas fluviales. No obstante, hay que tener presente que en las cuencas vertientes, cualquiera que sea su tamaño, son mucho más frecuentes los eventos torrenciales ordinarios que los extraordinarios.
4. Cuando en una cuenca vertiente tienen lugar eventos torrenciales extraordinarios, no sólo se intensifica en ella el ciclo del agua (caudales líquidos), sino también el de los sedimentos (caudales sólidos), actuando simultáneamente y desencadenando el *geo-*

dinamismo torrencial (erosión en la cuenca vertiente y en sus cauces de drenaje; transporte de los sedimentos por el flujo de escoorrentía y por los caudales de avenida y depósito de los mismos en las áreas dominadas de la cuenca). El bosque actúa con efectividad en la amortiguación del fenómeno del geo-dinamismo torrencial, en tal sentido su incidencia es muy superior a la que tiene sobre los caudales líquidos considerados de forma aislada; porque al proteger al suelo de la cuenca de la erosión hídrica, reduce también la emisión de sedimentos y el grado de aterramiento de las áreas de inundación de la cuenca. Sin embargo, su influencia disminuye conforme los eventos torrenciales resultan más extraordinarios y las cuencas vertientes presentan mayores superficies.

5. A lo anterior, hay que añadir que el bosque es la mejor defensa activa ante el fenómeno de desprendimiento de aludes, lo que supone otro factor importante a considerar en la ordenación hidrológico-forestal de las cuencas de montaña.
6. El bosque tiene un elevado consumo de agua por transpiración, que adquiere su máximo valor cuando los árboles se encuentran en su estado de mayor crecimiento, que depende de la especie (según sea de crecimiento rápido o lento) y del clima de la estación donde se ubica (sea clima templado-frío, templado, templado-cálido o tropical). Para climas templados y tratándose de especies de crecimiento rápido (como algunas especies de eucaliptos o pinos) su periodo de mayor consumo hídrico se encuentra entre los primeros 10-20 años. Este periodo se reduce en climas tropicales y se incrementa para climas más fríos.
7. Pasado el periodo de máximo desarrollo vegetativo en los árboles, éstos reducen su consumo hídrico, que va descendiendo conforme envejece la masa, hasta establecer un equilibrio con el medio. En dicha situación, que se puede identificar con el estado climático o pseudoclimático (dependiendo de la especie y de su ubicación), el bosque es la formación vegetal que mejor aprovecha las condiciones de agua, suelo y energía disponibles y, por tanto, la más estable.

8. La cuestión del consumo de agua por evapotranspiración tiene especial importancia en las repoblaciones, donde los árboles son coetáneos, especialmente si ocupan extensiones importantes en la cuenca vertiente y sobre todo si las repoblaciones se ubican en la cabecera de la cuenca, encontrándose ésta bien conservada y con abundantes reservas hídricas; en cuyo caso el nuevo arbolado puede secar manantiales situados aguas abajo durante el tiempo que transcurre hasta alcanzar la situación de equilibrio (climácico o pseudoclimácico).
9. Sin embargo, la situación anterior no se puede identificar con las *repoblaciones de cabecera con fines protectores*, realizadas sobre suelos pobres, sujetos a una fuerte erosión superficial, en los que el estado actual de los terrenos no es capaz de almacenar el agua de lluvia. Se trata de repoblaciones cuyo objetivo es generar suelo forestal, que favorezca la infiltración y reduzca la escorrentía superficial y la erosión del suelo en cabecera. En estas repoblaciones adquieren especial importancia la *elección de la especie* (que debe atemperarse al medio en el que se instala) y las *técnicas preparación de suelo* (que mejoren sus condiciones para retener el agua de las precipitaciones, para que en los años siguientes a la plantación ésta pueda superar las condiciones adversas del medio).
10. Tratándose de cuencas tropicales andinas de alta montaña, el *pajonal del páramo*, si se encuentra bien conservado, realiza las mismas funciones protectoras que los bosques de cabecera de las cuencas alpinas europeas y no requiere de las labores selvícolas de mantenimiento de éstas; luego representa la mejor opción en la ordenación de la cuenca.
11. Numerosas experiencias, efectuadas en *cuencas comparadas*, han demostrado que la tala del bosque existente en una cuenca vertiente incrementa la escorrentía en ésta; lo que permite que sea almacenada y utilizarla para otros usos. Pero las mismas *cuencas comparadas* han puesto en evidencia que, si la cuenca no se encuentra degradada, vuela a recuperar su tapiz vegetal siguiendo las etapas graduales de su sucesión climácica y reduciendo los incrementos de escorrentía conforme el crecimiento de la nueva vegetación arbolada incrementa sus necesidades hídricas.
12. En algunas cuencas y ante situaciones concretas, el consumo hídrico adicional que supone el bosque, sobre todo en el periodo de los 10-20 primeros años de una repoblación, puede plantear la conveniencia de sustituirlo por otro tipo de cubierta vegetal de menor consumo hídrico, como los pastizales; cuando el diferencial de consumo hídrico con el arbolado se requiera para otros fines; por lo que apremia disponer del mismo en forma de escorrentía y su posterior almacenamiento. Pero conviene aclarar que al incrementar la escorrentía, se acelera junto con el ciclo del agua el ciclo de los sedimentos, lo que puede acarrear problemas geo-torrenciales colaterales en caso de presentarse eventos torrenciales en la cuenca, aspecto que se debe evaluar previamente.
13. El bosque, especialmente el *bosque climácico*, es la formación más estable porque es la que mejor aprovecha la energía que le proporciona la naturaleza para situarse en el lugar donde se ubica y, por ello, la que mejor protege al suelo frente al geo-dinamismo torrencial. En consecuencia, si la alteración de ese estado natural no amenaza con la aparición de problemas, porque la energía que se libera resulta fácilmente controlable, cuando no aprovechable; como ocurre, por ejemplo, en la sustitución de los bosques de llanura por pastizales; la cuestión bajo el punto de vista de la ordenación agro-hidrológica no reviste discusión, se proporciona al suelo el uso que mejor se adapte a las necesidades de la población. Pero si sucede lo contrario, por ejemplo, se trata de un bosque en una ladera de fuerte pendiente ubicada en la cabecera de una cuenca, en la que, en el caso de sustituir el bosque por un pastizal, la energía del agua de escorrentía cause erosión en el suelo e incluso pueda producir deslizamientos superficiales ante aguaceros extraordinarios; la situación debe hacer pensar que, aunque inicialmente el pastizal proporcione una mayor escorrentía en las precipitaciones ordinarias, el peligro de deslizamientos ante precipitaciones extraordinarias, invita a plantear como algo muy

razonable la conservación del bosque en el paraje en cuestión.

14. En síntesis, el ciclo del agua y el de los sedimentos dentro de la cuenca vertiente está supeditado a las ecuaciones físicas de continuidad (conservación de la masa) y del movimiento (conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la energía). El bosque incide en ambos ciclos, amortiguando sus efectos. Algunas investigaciones han prestado mayor atención al ciclo del agua, acentuando el peso de la ecuación de continuidad en relación con este recurso y en sus conclusiones se han especializado en los efectos de las cubiertas vegetales en el aprovechamiento del agua como recurso. Otras investigaciones, cronológicamente anteriores, se han centrado casi exclusivamente en los problemas de erosión del suelo y la consiguiente degradación de la cuenca hidrográfica, lo que les ha conducido a dar mayor peso a la ecuación de la dinámica del agua, atendiendo de un modo implícito a la ecuación de continuidad. El desarrollo de uno u otro tipo de investigación responde a las prioridades adoptadas al inicio de cada una de ellas. Ambas resultan complementarias, aunque tengan también un campo específico para su desarrollo, y ambas son útiles y necesarias. Pero en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente se deben compaginarlas para que resulten efectivas.
15. Junto a ellas se debe contemplar la *vegetación climática* como la formación más estable en el medio y la que mejor utiliza la energía que recibe. El bosque constituye en numerosas ocasiones la vegetación climática de la estación donde se ubica; por lo que ante su previsible sustitución, se debe analizar el modo de aprovechar o disipar la energía que se libera, especialmente ante las situaciones derivadas de los eventos torrenciales que tengan lugar en la cuenca.
16. En la *ordenación agro-hidrológica* de una cuenca es preciso considerar las necesidades de la población que habita en ella; por tanto, resulta necesario compaginar el bosque con otros usos del suelo que proporcionan los medios necesarios para su mantenimiento; reservando al bosque la función de infraes-

tructura que le corresponde, que sirva para proteger a la cuenca ante eventos torrenciales, para evitar su degradación física y para mantener su equilibrio biológico durante los periodos entre eventos torrenciales.

Agradecimientos

Este documento es un resumen de la contribución de la Universidad Politécnica de Madrid al Proyecto INCO-CT2004-510739 del Sexto Programa Marco de la CE titulado EPIC FORCE (Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt), liderado por el Dr. J. C. Bathurst de la Universidad de Newcastle (R. U.), en el que participaron, además, de las Universidades de Padua (Italia), Nacional de Costa Rica (Costa Rica), Cuenca (Ecuador), Austral (Chile), Nacional de La Plata (Argentina) y Secretaría de Desarrollo Sustentable y Ambiente de Tierra del Fuego (Argentina).

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉASSIAN, V.; 2004. Waters and Forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrology* 291: 1-27
- BENNET, H.H.; 1939. *Soil Conservation*. Mac Graw-Hill Co. New York.
- BOSCH, J.M. & HEWLETT, J.D.; 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrology* 55: 3-23.
- BRUIJNZEEL, L.A.; 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture Ecosystems and Environment* 104: 185-228.
- BRUIJNZEEL, L.A.; BONELL, M.; GILMOUR, D.A. & LAMB, D.; 2005. Conclusion: Forests, water and people in the humid tropics: an emerging view. In: M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (eds.), *From Forests, water and people in the humid tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management*: 906-925. Cambridge University Press UNESCO. Cambridge.

- CEBALLOS, L. & ORTUÑO, F.; 1952. El bosque y el agua en Canarias. *Montes* 48: 418-423.
- CALDER, I.R.; 1998. Water use by forests: limits and controls. *Tree Physiology* 18: 625-631.
- CALDER, I.R.; 1999. *The Blue Revolution, Land use and Integrated Water Resources Management*. Earthscan Publications Ltd. London.
- COSANDEY, C.; 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel?. *Annales de Géographie* 581-582: 7-25.
- GARCÍA NÁJERA, J.M.; 1954. *Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración)*. I. F. I. E. Madrid.
- GARCÍA NÁJERA, J.M.; 1955. *El bosque, el agua y la conservación del suelo, pendiente máxima admisible en los pastizales*. I.F.I.E. Madrid
- HUBERT, A. & IROUMÉ, A.; 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *J. Hydrology* 248(1-4): 78-92.
- IROUMÉ, A. & HUBERT, A.; 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziessi* plantation. *Hydrological Processes* 16(12): 2347-2361.
- KITTREDGE, J.; 1948. *Forest Influences: the Effects of Woody Vegetation on Climate, Water and Soil, with Applications to the Conservation of Water and the Control of Floods and Erosion*. McGraw Hill. New York.
- HIBBET, A.R.; 1967. Forest treatment effects on water yield. In: W.E. Sopper & H.W. Lull (eds.), *Forest Hydrology, Proceedings of a National Science Foundation at Advanced Science Seminar*: 527-543. Pergamon Press. Oxford.
- HIBBET, A.R.; DAVIS, E.A. & BROWN, T.C.; 1975. Managing chaparral for water and others resources in Arizona. *Watershed Management Symposium*: 445-468 ASCE, Longan, Utah.
- INGWERSEN, J.B.; 1985. Fog drip, water yield, and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed, Oregon. *Water Resources Bulletin* 21(3): 469-473.
- LENZI, M.A.; COMITI, F.; MAO, L.; ANDREOLI, A.; PECORARI, E.; RIGON, E. & PICCO, L.; 2007. *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce (Best practice guidelines for dealing with large wood debris)*. Deliverable D22, Equipo del Proyecto EPIC FORCE de la Universidad de Padova (Italia).
- LENZI, M.A.; D'AGOSTINO, V. & SONDA, D.; 2000. *Ricostruzione Morfologica e Recupero Ambientale dei torrente*. Editoriale Bios. Italy.
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. & BLANCO CRIADO, M.; 1968. *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales*. I.F.I.E. Madrid
- MINTEGUI AGUIRRE, J.A.; DE SIMÓN NAVARRETE, E.; GARCÍA RODRÍGUEZ, J.L. & ROBREDO SÁNCHEZ, J.C.; 1993. *La restauración hidrologico-forestal de las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca.. Sevilla.
- MINTEGUI AGUIRRE, J.A. & ROBREDO SÁNCHEZ, J.C.; 2008. *Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques en cuencas de montaña*. UNESCO, Documentos Técnicos PHI-LAC N° 13. Montevideo. <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001592/159245s.pdf>
- MOLCHANOV, A.A.; 1960; 1963, traducido al inglés; 1966, 2ª edición inglesa. *The hydrological role of forests*. Academy of Science of the U.R.S.S. Moscú. (traducido por A. Gourevitch (Israel Program for Scientific Translation).
- PAVARI, A. & DE PHILIPPIS, A.; 1941. *La sperimentazione di specie forestali esotiche in Italia. Risultati del primo ventennio*. Stazione Sperimentale di Selvicoltura, Firenze. Roma.
- PENMAM, H.L.; 1963. *Vegetation and Hydrology*. Farnham Royal Book, C.A.B. London.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A. & PORTER, J.P.; 1991. RUSLE: Revisited Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Conservation* 46(1): 30-33
- ROBERTS, S.; VERTESSY, R.A. & GRAYSON, R.B.; 2001. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecol. Manage.* 143: 153-161.

- VERTESSY, R.A.; BENYON, R.G.; O'SULLIVAN, S.K. & GRIBBEN, P.R.; 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology* 15: 559–567.
- VERTESSY, R.A.; HATTON, T.J.; REECE, P.; O'SULLIVAN, S.K. & BENYON, R.G. (1997) Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique. *Tree Physiology* 7(12): 747–756.
- VERTESSY, R.A.; WATSON, F. & O'SULLIVAN, S.K.; 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecol. Manage.* 143: 13–26.
- WISCHMEIER, W.H.; 1959. A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation. *Proceeding Soil Scientific Society of America* 23: 246-249.
- WISCHMEIER, W.H.; 1960. Cropping-management factor evaluation of a Universal Soil Loss Equation. *Proceeding Soil Scientific Society of America* 24: 322-326.
- WISCHMEIER, W.H.; 1974. News developments in estimating water erosion. *In: Proceeding of the 29th Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America*: 179-186. Ankeney, Iowa.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D.; 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning.* Agricultural Handbook, num. 537. Washington DC