

EL PAPEL DEL BOSQUE EN LA REGULACIÓN DE LOS CICLOS DEL AGUA Y DE LOS SEDIMENTOS EN CUENCAS DE CURSOS TORRENCIALES, ANTE LA INCIDENCIA EN ELLAS DE EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTRAORDINARIOS: ASPECTOS PRÁCTICOS.

Juan Ángel Mintegui Aguirre

Unidad de Hidráulica e Hidrología. Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

E-mail: juanangel.mintegui@upm.es

RESUMEN

Se describe el geo-dinamismo torrencial como una intensificación de los ciclos del agua y de los sedimentos en una cuenca hidrográfica y se especifica la morfología de las cuencas de montaña, donde este fenómeno se agranda. Se comenta que el bosque ha sido considerado tradicionalmente como un agente protector de las cuencas de montaña y la evolución histórica de esta concepción; analizando a continuación la incidencia del bosque en los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca vertiente, para concluir diferenciando las reforestaciones protectoras de las de carácter productivo. El texto se completa con imágenes de la corrección del torrente de Arratiecho junto con la restauración hidrológico-forestal de su cuenca vertiente en el Pirineo Aragonés (2001-04) y su estado actual en marzo de 2012.

Palabras clave: geo-dinamismo torrencial; cuenca de montaña; bosque; corrección del torrente; restauración hidrológico-forestal de la cuenca.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente en la Europa continental y montañosa la relación entre el agua y el bosque se ha identificado con la utilización del arbolado en la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas de montaña, a fin de contener o en su defecto amortiguar el desencadenamiento en ellas del fenómeno del geo-dinamismo torrencial, provocado por la incidencia en las mismas de eventos meteorológicos extraordinarios (aguaceros, fusiones repentinas del manto de nieve y, en un contexto complementario, por el desprendimiento de aludes). Ello se debía a que desde el siglo XIX los restauradores de cuencas de montaña habían comprobado experimentalmente que el bosque incidía en los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de la cuenca. Quizá las mediciones *ad hoc* fueran escasas, pero lo que no faltaba era información sobre los efectos que la ausencia del bosque causaba sobre las propias obras y trabajos de restauración; por esta razón el bosque se ha considerado un elemento protector de la cuenca ante los eventos torrenciales. En otro contexto, también se ha argumentado que el bosque condiciona las disponibilidades de agua en la cuenca. Ambas son evidencias que este documento analiza, considerando todos los efectos que las masas arboladas tienen sobre los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca vertiente; apoyándose para ello en fundamentos físicos y en determinados aspectos constatando con experiencias concretas que lo demuestran. No obstante, el documento pretende resaltar los aspectos prácticos del papel tradicional del bosque como elemento restaurador de las tierras de montaña, su temporalidad y su carácter socio-económico.

La exposición de la ponencia se plantea del modo siguiente. *a)* Se sintetiza el contenido del término geo-dinamismo torrencial y se recuerda la morfología que presentan las cuencas de montaña, como punto de partida para la exposición; *b)* Se repasa la evolución del modo de entender los efectos del bosque en la protección de las cuencas de montaña; *c)* Se analiza la incidencia del bosque en los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de la cuenca vertiente; *d)* Se comentan los tipos de reforestaciones atendiendo a los objetivos que se pretenden con ellas y *e)* Se completa el texto con un ejemplo concreto: la restauración hidrológico forestal de una pequeña cuenca de montaña en el Pirineo Aragonés: la cuenca del torrente de Arratiecho.

2. INTENSIFICACIÓN DE LOS CICLOS DEL AGUA Y DE LOS SEDIMENTOS EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA ANTE LA INCIDENCIA EN ELLA DE EVENTOS TORRENCIALES: EL GEO-DINAMISMO TORRENCIAL

El agua se incorpora a la cuenca vertiente a través de las precipitaciones, que pueden ser moderadas o torrenciales. Estas últimas suponen una abundancia de precipitación en un intervalo de tiempo reducido y, a su vez, pueden ser ordinarias o extraordinarias. El funcionamiento del ciclo del agua en la cuenca vertiente ante las precipitaciones torrenciales extraordinarias tiene implicaciones más allá de un aumento de las escorrentías superficiales y de un incremento importante de los caudales de avenida en sus cauces; pues al tratarse de importantes volúmenes de agua que se ponen en movimiento en un corto intervalo de tiempo, activan el ciclo de los sedimentos. Éste se inicia con la aparición de procesos de erosión del suelo en la superficie vertiente o área dominante de la cuenca (por el efecto de las precipitaciones y de las escorrentías de ladera) y en sus cauces de drenaje (por la abrasión de los mismos por los caudales de avenida); lo que pone en movimiento una importante cantidad de sedimentos, que son transportados por las escorrentías en las laderas hasta concentrarlos en los cauces, desde donde se incorporan a los flujos de avenida y continúan su tránsito con ellos; para concluir depositándose, cuando la corriente pierde energía y en consecuencia capacidad suficiente para seguir transportarlos. Estos procesos, mostrados en la Figura 1 (Mintegui & Robredo, 2008), constituyen el fenómeno del geo-dinamismo torrencial, que es particularmente intenso en las pequeñas cuencas de montaña debido a sus características geomorfológicas. En estas cuencas se diferencian cuatro partes: *a)* el área dominante o superficie vertiente; *b)* la garganta; *c)* el cono de sedimentación y *d)* el canal de desagüe; pudiendo no existir este último, cuando el curso de montaña desemboca directamente en un curso de mayor caudal al que es tributario (Figura 2).

Esta situación hace de estas cuencas *unidades de estudio*, porque en ellas los ciclos del agua y de los sedimentos tiene un comportamiento específico, y *de gestión*, porque cuando están pobladas sus habitantes se pueden ver obligados a limitar el uso de sus recursos, especialmente del suelo, para poder evitar o en su defecto atenuar los riesgos derivados del geo-dinamismo torrencial; lo que conlleva a la planificación del aprovechamiento de la cuenca, para que resulte sostenible a lo largo plazo. Por tanto, la ordenación, la restauración cuando se precise y la posterior gestión de las cuencas de montaña, implica una utilización eficaz de sus recursos naturales agua y suelo, en consonancia con el comportamiento físico en la misma de los ciclos del agua y de los sedimentos; atendiendo, tanto a los cortos intervalos (días) en los que ocurren los eventos torrenciales, como en los largos periodos que discurren entre ellos y evitando en todas las situaciones que la cuenca entre en un proceso de degradación. En todo ello el bosque juega un papel importante.

Lo comentado para los eventos torrenciales extraordinarios, también hay que considerar para los eventos torrenciales ordinarios, porque también éstos intensifican los ciclos del agua y de

los sedimentos en la cuenca, aunque sus efectos sean más suaves, y causan pérdidas de suelo y de cosechas, por tanto, reducen los recursos naturales de la cuenca y empobrecen a sus habitantes, especialmente cuando no se adoptan medidas para controlar dichos efectos y la cuenca entra en un proceso de paulatino deterioro, que puede desembocar a largo plazo en procesos de desertificación.

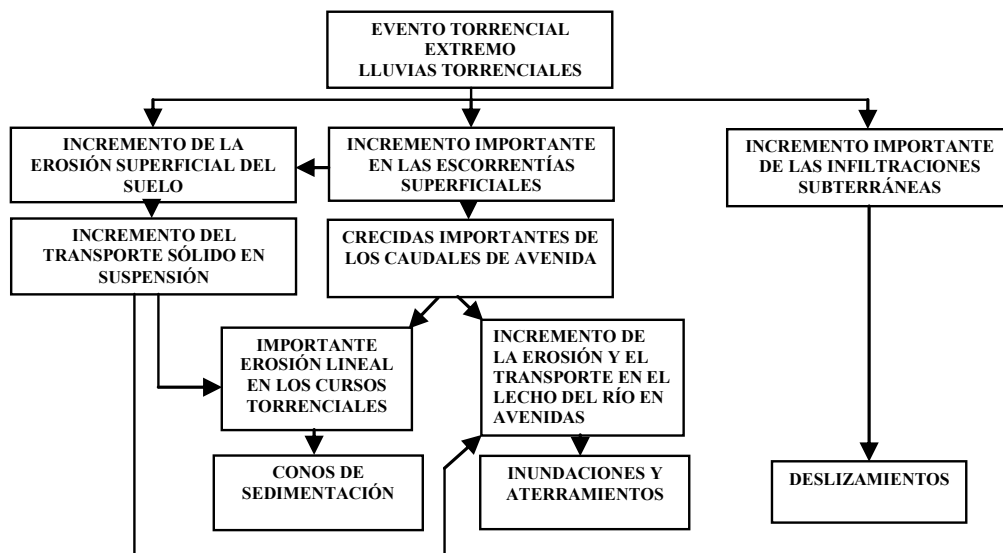


Figura 1. Los efectos del geo-dinamismo torrencial en la cuenca hidrográfica

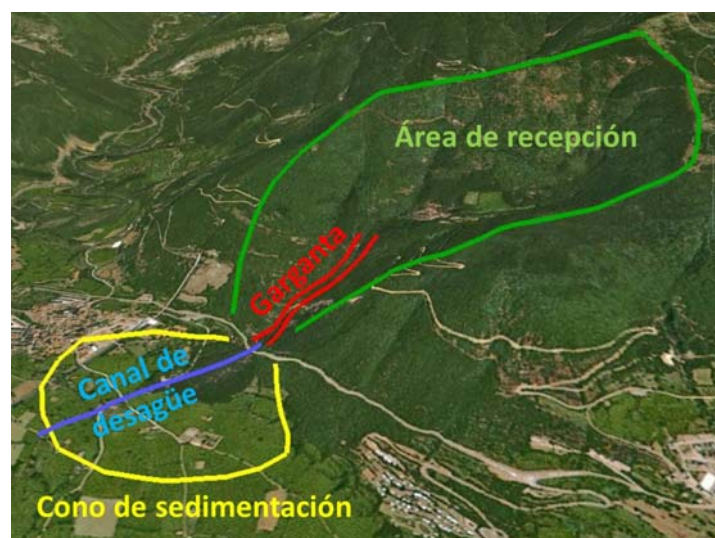


Figura 2 Diferentes partes de una cuenca torrencial de montaña (cuenca del torrente de Arratiecho, en el Pirineo de Huesca)

3. EVOLUCIÓN DEL MODO DE ENTENDER LOS EFECTOS DEL BOSQUE EN LA PROTECCIÓN DE LAS CUENCAS DE MONTAÑA

Surrell (1841) puede considerarse como el primer ingeniero restaurador de cuencas de montaña en la era moderna, como apunta **Andréassian** (2004) en un artículo en el que sintetiza las controversias que se suscitaron en Francia en los inicios del siglo XIX, entre los partidarios de las fracciones que podían definirse por *naturalistas*, defensores de la influencia

del bosque en el microclima de una región, y de los *ingenieros* que lo ponían en duda, aunque admitieran la influencia de la vegetación en el ciclo del agua dentro de la cuenca. Los *naturalistas*, entre los que figuraba **Becquerel** (1853), argumentaban que las intensas sequías, seguidas por inundaciones, que asolaron a Francia durante el periodo en cuestión, se debían a la deforestación que se había producido en el país desde el final del siglo XVIII, aprovechando el vacío de autoridad que había provocado la Revolución Francesa (1789). Ante esta posición los *ingenieros* sugerían que dichas premisas debían ser probadas con mediciones; entre éstos destacan **Surrell** y **Belgrand**, este último fue pionero en organizar mediciones hidrométricas comparativas, para evaluar el impacto hidrológico de las masas forestales (1853).

Surrell no atribuía al bosque incidencia sobre el microclima de una región, pero llevó a cabo la dirección de los trabajos de corrección de torrentes en los Alpes Franceses, profundamente deforestados y degradados en su tiempo, y observó que era absolutamente necesaria la presencia del bosque en las cuencas que vertían a dichos cursos, para controlar la erosión del suelo en ellas y evitar con ello que, cuando se desencadenase el geo-dinamismo torrencial en la cuenca, se produjera una emisión sedimentos elevada a los cauces de los torrentes, que alterasen sustancialmente las condiciones proyectadas para la circulación de la corriente de crecida en los mismos. Fue el autor del primer tratado moderno de corrección de torrentes e impulsó a que el Parlamento de Francia aprobara la primera Ley de Reforestación de Montes (1860), a la que siguió la Ley de Planificación de Montes (1864) y más adelante la Ley de Rehabilitación y Conservación de Suelos en las áreas de montaña (1882), proveyendo a su país de un marco legal propicio para la conservación de las tierras de montaña, que ha influido hasta el presente. La metodología francesa de corrección de torrentes fue seguida en todos los países europeos con grandes cadenas montañosas en su territorio, como Austria, Suiza, Italia, Baviera (al sur de Alemania), los países balcánicos y, por supuesto, España; que a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX también tenían muchas de sus montañas deforestadas y con sus suelos degradados. En nuestro país se promulgaron dos decretos importantes en línea con las leyes aprobadas por el parlamento de Francia: el R. D. de 3 de febrero de 1888 de organización de los trabajos de repoblación en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de España y el R. D. de 7 de junio de 1901 que establecía los Servicios Hidrológico-Forestales, orientados principalmente a la corrección de las cuencas de los torrentes de montaña.

La metodología de **Surrell** fue actualizada por **Thiery** (1891). Este autor continuó considerando al torrente como un elemento singular en el ámbito de la dinámica del agua en cauces abiertos y sintetizó la necesidad de conjugar las obras hidráulicas de corrección en los cauces torrenciales, con la restauración de sus cuencas alimentadoras; proponiendo para estas últimas su reforestación. **García Nájera** (1943) conoció en profundidad la obra de **Thiery**, lo que le permitió implementar algunos de sus contenidos esenciales. En este contexto desarrolló una ecuación para la corriente con arrastres (un modo *sui generis* de entender el flujo monofásico), pensada como procedimiento para establecer la pendiente de compensación (equilibrio) del torrente, parámetro esencial para diseñar su corrección; así como para describir el hipotético desarrollo geométrico en la formación del cono de sedimentación de un torrente. Posteriormente **Meunier** (1991) recopiló los avances del estado del conocimiento sobre el comportamiento de los torrentes de montaña y, junto con sus propias experiencias, los adecuó para su aplicación en los trabajos de corrección de torrentes. En un aspecto más pragmático se mencionan también las publicaciones de **López Cadenas de Llano** (1988); **Mintegui & López-Unzu** (1900); **Mintegui et al** (1993) y **López Cadenas et al** (1994).

Las cuencas de montaña restauradas cuentan con una infraestructura importante que afecta a sus economías; sin que muchas veces se asuma, ni se valore, los esfuerzos que exigió en el pasado; ni tampoco se percate de la necesidad actual de mantenerlas en buen estado de conservación; además han contribuido a crear una sensibilidad naturalista en la sociedad; que plantea la reconstrucción de los torrentes con criterios fluvio-morfológicos, con adecuación paisajística al entorno y manteniendo el hábitat del propio torrente, especialmente en las áreas protegidas o turísticas. Diversos autores, entre ellos **Lenzi et al.** (2000), han realizado propuestas en este sentido. No debe olvidarse, sin embargo, que los auténticos objetivos que condicionaron los trabajos de restauración en el pasado fueron la seguridad y sustentabilidad de los pobladores de la montaña y el manteniendo de las vías de comunicación en la misma.

4. LA INCIDENCIA DEL BOSQUE EN LOS CICLOS DEL AGUA Y DE LOS SEDIMENTOS DENTRO DE LA CUENCA VERTIENTE

Para centrar la cuestión, se recuerdan las siguientes cuestiones previas: *a)* El agua como elemento cumple con la ecuación de continuidad; *b)* El agua en su recorrido por la cuenca verifica también con la ecuación de la dinámica; *c)* En la práctica no se puede entender el ciclo del agua de un modo atemporal, sino ligado al periodo analizado; *d)* El bosque existe de forma natural y estable donde se dan las condiciones climáticas y edáficas para instalarse y tiende a una formación climax que es la más estable. Además, por su diferente repercusión en los ciclos del agua y de los sedimentos, también se diferencian los siguientes periodos: *1)* Los cortos pero intensos en los que suceden los eventos torrenciales y *2)* Los prolongados que discurren entre eventos torrenciales consecutivos. Para ambas situaciones, el esquema de la Figura 3 muestra de un modo sintético la relación entre el bosque y el ciclo del agua.

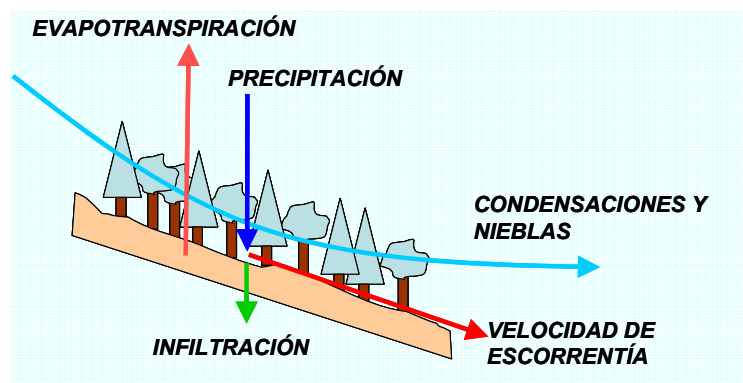


Figura 3. Síntesis de los efectos del bosque en el ciclo del agua.

Establecido el marco del análisis, se define su propósito: precisar el comportamiento de la vegetación arbolada en la ordenación y restauración de la cuenca vertiente; considerando que el bosque interviene en los tres procesos (que no necesariamente tienen el mismo peso en todas las situaciones) siguientes: *1)* La protección de la cuenca ante los efectos que le puedan causar los eventos torrenciales; *2)* La cuestión de las necesidades de agua en la cuenca, dado que la vegetación arbolada supone un consumo hídrico, que podría repercutir en las mismas y *3)* La conservación de los suelos y de los ecosistemas para evitar su deterioro irreversible. A ellos se añade que la ordenación de la cuenca y su restauración, cuando es necesaria, son técnicas al servicio de la población que vive en la misma y de la que se ubica aguas abajo y se ve condicionada por lo que sucede en ella. Además, al tratarse de masas arboladas, se debe

planificarse a largo plazo. A continuación se desarrollan sucintamente estas cuestiones. *a)* La protección de la cuenca ante los efectos que le puedan causar los eventos torrenciales y *b)* Las necesidades hídricas del bosque y su repercusión en las disponibilidades de agua en la cuenca.

4.1. La protección de la cuenca ante los efectos que le puedan causar los eventos torrenciales

Se trata de contestar a las preguntas siguientes: *1)* ¿En que medida contribuye el bosque a laminar las avenidas e inundaciones? y *2)* ¿Cómo actúa el bosque en el control del geo-dinamismo torrencial desencadenado en la cuenca por los eventos torrenciales o por la repentina fusión del manto de nieve?.

4.1.1. El bosque en la laminación de las avenidas e inundaciones

Toda avenida tiene su origen en una precipitación torrencial o en una fusión repentina del manto de nieve. En el tránsito entre la precipitación y la escorrentía superficial intervienen las características de la cuenca, entre ellas el uso del suelo o tipo de vegetación. Al ser el bosque la vegetación más desarrollada, influye en la generación de las inundaciones; al incidir en la formación de las escorrentías. Ahora bien, conforme aumenta la duración de la precipitación, disminuye la capacidad de infiltración en el suelo, aumentando con ello la escorrentía y por tanto el caudal punta del aguacero.

Para precipitaciones extremas, conviene diferenciar si se trata de grandes cuencas hidrográficas ($> 100.000 \text{ Km}^2$) o de pequeñas cuencas de montaña ($< 100 \text{ Km}^2$). *1)* En las primeras el bosque tienen escasa influencia o prácticamente nula en la laminación o atenuación de las grandes avenidas y, en consecuencia, sobre las inundaciones causadas por ellas; pero para que esta hipótesis sea formalmente válida, se deben cumplir: *a)* Que la precipitación extrema tenga lugar a la vez en toda la cuenca o sobre una superficie importante de la misma; *b)* Que realmente exista una proporción significativa de bosque en la cuenca, para poder implicarle su influencia. *2)* Tratándose de las segundas, el tiempo de concentración de la avenida está limitado por las características morfológicas de la cuenca, lo que a su vez reduce el tiempo al pico del hidrograma de avenida, condicionando a que el caudal punta del hidrograma presente dos limitaciones: *a)* La que se deriva de la propia morfología de la cuenca; *b)* La que resulta, en el caso de existencia del bosque, de la reducción aplicada a la precipitación para convertirla en escorrentía superficial. En consecuencia, el bosque puede llegar a influir en la laminación de las avenidas, o más bien de las crecidas, pues se trata de pequeños cursos de agua. Pero nunca se debe olvidar: *1)* 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 las escorrentías superficiales y transmitiendo sus efectos hasta laminar las avenidas e inundaciones y *2)* que los eventos torrenciales ordinarios son mucho más frecuentes que los extremos.

4.1.2. El bosque en el control del geo-dinamismo torrencial

Los efectos del bosque 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: *1)* El control de la erosión del suelo en la cuenca; *2)* La reducción de la carga sólida en suspensión que transportan los cursos que drenan por la misma; *3)* La disminución de la tensión cortante de la corriente que circula por ellos; *4)* La reducción del transporte

sólido de fondo. Es decir, interviene activamente en el control del geo-dinamismo torrencial, que se ha sintetizado en la Figura 1.

Todo ello se produce porque el bosque bien conservado: 1) Resta energía cinética al movimiento superficial del agua sobre el terreno, al presentarle una mayor rugosidad para su circulación; 2) Contribuye a una mayor retención del agua por infiltración y 3) Aporta un efecto de colchón protector al suelo ante el impacto de las gotas de lluvia.

La función protectora del bosque ante el geo-dinamismo torrencial resulta muy diferente dependiendo del tamaño de cuenca. En las pequeñas cuencas de montaña todos los procesos del geo-dinamismo torrencial se manifiestan en un espacio reducido y en un corto periodo de tiempo, esto le hace muy agresivo y además se presenta con una recurrencia reducida (periodos de retorno entre 10 y 25 años). En estas cuencas los principales efectos del bosque son: a) Su capacidad de sujeción y estabilización del suelo en las laderas con fuertes pendientes ante las escorrentías superficiales y b) Su contribución en la disminución de la carga sólida que llega a los torrentes. Por ello se justifica la reforestación (con vegetación leñosa), cuya finalidad es la de estabilizar las laderas. Se comenta como una situación excepcional, que en las cuencas de alta montaña de América Latina (> 3.000 m snm) el páramo bien conservado tiene un efecto hidrológico similar al bosque protector de montaña. En las grandes cuencas fluviales el geo-dinamismo torrencial puede ocasionar las situaciones siguientes: 1) Que de manera extraordinaria afecte plena y simultáneamente a toda la cuenca hidrográfica, en este caso se presenta una situación de desastre o catástrofe. 2) Que no incida a la vez en toda la cuenca, se trata de la situación normal, en cuyo caso los efectos de erosión, transporte y sedimentación afecten de diferente manera en las distintas zonas de la cuenca; con lo que agronómica e hidráulicamente éstos se tratan de forma separada.

Uno de los grandes problemas relacionado con el geo-dinamismo torrencial que se presenta en las grandes cuencas fluviales es la erosión hídrica en cultivos y pastizales; para cuyo control se debe atender a las clasificaciones agrológicas y a las técnicas de uso y conservación de suelos. ¿Dónde y cuando es necesario mantener el bosque en las grandes cuencas hidrográficas?. En aquellos lugares donde su desaparición representa un grave riesgo de incremento del geo-dinamismo torrencial en caso de eventos torrenciales. Esto ocurre en terrenos con fuertes pendientes y sobre todo en los situados en las cabeceras de las cuencas.

Un esquema básico de ordenación de los usos del suelo para protegerlos de la erosión hídrica es el siguiente: 1) En pendientes del terreno $p < 12\%$ se trata de suelos agrícolas, sujetos a buenas prácticas de cultivo y a la conservación de su productividad; 2) Entre $12\% < p < 30\%$, los suelos pueden mantener su vocación agrícola, pero con trabajos importantes de conservación de suelos. También se pueden utilizar como pastizales; 3) Los pastizales bien conservados aseguran la protección al suelo ante la erosión hasta $p < 30\%$, disminuyendo a partir de este valor con el gradiente del terreno; 4) A partir de $p > 30\%$ la protección solo lo asegura el bosque (vegetación leñosa densa), pero las restantes cubiertas permanentes también protegen al suelo ante la erosión hídrica, aunque en menor medida. Todo lo expuesto es cierto y se fundamenta en los múltiples ensayos realizados por la **USDA-Soil Conservation Service** y sus ramificaciones por todo el mundo; pero es preciso entenderlo en el contexto de dichos ensayos, en los que al suelo de la parcela de ensayo con frecuencia se le somete a una precipitación importante. Dicho de otra forma, el esquema es totalmente válido y seguro, pero puede resultar un criterio excesivamente riguroso en la ordenación de algunas cuencas de montaña pobladas en países en desarrollo.

En cuanto a la vegetación de riberas y márgenes fluviales: *a)* Evita un importante aporte de sedimentos directos al cauce desde sus vertientes laterales directas; *b)* Incrementa la resistencia de los márgenes del cauce a la abrasión producida por la tensión tractiva de la corriente durante las avenidas; *c)* Ambos efectos contribuyen a la protección del cauce y a mejorar la calidad de las aguas; *d)* En avenidas extraordinarias sus efectos se reducen.

El bosque de montaña contribuye de varias maneras en la estabilidad del manto de nieve: *a)* Sus troncos constituyen 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 llega al suelo tras iniciar la metamorfosis destructiva; *c)* La cubierta forestal atenúa los efectos del enfriamiento, lo que conduce a una metamorfosis más rápida que en terreno al descubierto. El bosque impide el desprendimiento de aludes, por tanto se le considera una medida de protección activa ante su riesgo; pero es incapaz de frenarlos una vez que se han desprendido.

4.2. Las necesidades hídricas del bosque y su repercusión en las disponibilidades de agua en la cuenca

Con respecto a este epígrafe cabe plantearse: *1)* ¿Cuál es la repercusión de las superficies arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente?; pero también *2)* ¿Influye el bosque en el origen de las precipitaciones?

4.2.1 La repercusión de las superficies arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente

Continuando con el artículo de **Andréassian**, las controversias entre los *naturalistas*, que también se sumaron a las mediciones, y los *ingenieros* llegaron hasta el final del Tercer Imperio (1865-70), sin otra resolución que la de la necesidad de mantener las mediciones, cuyos resultados permitieran probar las hipótesis de partida. Más adelante el debate se trasladó a los Estados Unidos a través de **Pinchot** que, tras estudiar en la Escuela Forestal de Nancy, llegó a ser su primer director del Servicio de Bosques (1905); lo que propició que dicha controversia se convirtiera en el móvil de las experiencias centradas en el marco de las *cuencas comparadas*.

Tras más de cincuenta años investigando en estas cuencas, se dispuso de los datos suficientes para afirmar que la transformación de extensas superficies de una cuenca hidrográfica de rasas en arboladas o viceversa, causa importantes alteraciones en su balance hídrico (cuestión que podría tener un especial interés en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca, pues condiciona el posible aprovechamiento del agua por sus habitantes), pero que este efecto es transitorio. Para explicarlo, se comentan continuación los resultados de las experiencias en cuencas comparadas para las dos situaciones siguientes: *a)* El efecto de la deforestación en cuencas vertientes; *b)* El efecto de la recuperación de la cubierta arbolada en la cuenca vertiente tras su deforestación

a) En relación con el efecto de la deforestación, las experiencias en cuencas comparadas mostraron: *1)* En los años siguientes a la tala del bosque aumentaron las escorrentías en la cuenca; lo que evidencia que el bosque consume el agua (por transpiración e interceptación) que durante su existencia no escurre por la cuenca tras las precipitaciones; pero también favorece la infiltración. *2)* La sustitución del bosque por otras cubiertas vegetales de menor porte (ejemplo, pastizales) pondría a disposición del usuario unas aportaciones hídricas a

modo de escorrentías. 3) Pero, al incrementar las escorrentías se activa, conjuntamente con el ciclo del agua, el ciclo de los sedimentos; lo que ante eventos torrenciales extraordinarios podría derivar en un incremento del geo-dinamismo torrencial en la cuenca, con erosiones en sus áreas dominantes y sedimentaciones en las dominadas, esto justifica la presencia del bosque en determinadas áreas.

b) En relación con el efecto de la recuperación de la cubierta arbolada en la cuenca tras haber sido deforestada, se pone de manifiesto que: 1) Salvo en cuencas degradadas, el bosque tiende a colonizar de nuevo la cuenca que ha sido deforestada, si no se toman las medidas para evitarlo; 2) **Hibbert** (1967) estudió este efecto a medio y largo plazo en varias cuencas experimentales deforestadas en Coweeta (Estados Unidos) y comprobó que los efectos de la deforestación tenían una duración entre 7 y 25 años en las diferentes cuencas tratadas, posteriormente su efecto sobre las escorrentías prácticamente se anulaba; 3) Investigadores posteriores como **Adr assian** (2004) han llegado a resultados semejantes. 4) **Vertessy et al.** (2001), investigando con eucaliptos en Australia, establecieron la máxima transpiración en las plantas hacia los 15 años de edad, coincidiendo con su mayor crecimiento; aspecto comprobado también por otros investigadores.

Sintetizando: 1) El mayor consumo del arbolado es durante la fase de su regeneración y mayor crecimiento, lo que afecta fundamentalmente a los 10-20 primeros años de las reforestaciones. 2) 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. Este equilibrio puede llegar a ser climático o pseudoclim tico. 3) Los estudios fito-climáticos establecen que cada tipo de bosque tiene unas características culturales que le hacen aptos para determinadas estaciones; es decir, el bosque existe de forma natural y estable donde se dan las condiciones climáticas y edáficas para instalarse y tiende a una formación estable o climax, que se puede interpretar como la que utiliza toda la energía que le dispensa la naturaleza para mantener dicha formación. Si ésta altera, se libera flujo y energía; ambos pueden ser aprovechados pero, si no se controlan, se dinamiza el fenómeno del geo-dinamismo torrencial y pueden aparecer problemas por erosión-sedimentación en la cuenca. 4) En algunas cuencas se puede plantear la conveniencia de sustituir el bosque por otra cubierta vegetal de menor porte y consumo hídrico; cuando se necesita la diferencia de aportación hídrica para otros fines; pero a sabiendas que esta opción supone mayores riesgos ante la aparición del geo-dinamismo torrencial en la cuenca vertiente; 5) Una limitación de las experiencias realizadas en cuencas comparadas es que en su mayor parte se trata de pequeñas cuencas < 2 Km², por tanto, existe un efecto de escala difícil de precisar.

4.2.2. El bosque en el origen de las precipitaciones

Para que se produzca una precipitación se precisa vapor de agua en la atmósfera y que éste alcance el punto de condensación. El bosque influye en ambos procesos, pero no siempre de forma simultánea y con la intensidad necesaria y suficiente para que surta efecto. Si lo hace se trata de fenómenos locales y pocas veces son significativos. Los únicos bosques que pueden tener una influencia decisiva en el incremento de recursos hídricos de la cuenca vertiente, son los conocidos como bosques nubosos, que contribuyen con su porte a ero a la formación de las *precipitaciones horizontales* o *nieblas*, característicos de determinados 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 & Ortuño** (1952) o en la franja costera de Oregon en Estados Unidos **Ingwensen** (1985)

5. TIPOS DE REFORESTACIONES ATENDIENDO A LOS OBJETIVOS

No todas las repoblaciones forestales son iguales, se diferencian por: a) Sus objetivos, las hay de protección, de producción y de otros fines; b) Las técnicas empleadas en su implantación en el territorio; c) Por el consumo de agua y nutrientes de las mismas. A continuación, se comentan las diferencias entre las de producción y las de protección.

En las repoblaciones productivas, con especies de crecimiento rápido y buenas condiciones de acogida del medio, las características fisiológicas de la planta son un factor determinante en la elección de especie, para asegurar la producción esperada con la plantación. En este tipo de plantaciones tiene pleno sentido contemplar el balance hídrico, para asegurar el rendimiento de las plantaciones y sobre todo para no desabastecer las necesidades hídricas aguas abajo de su ubicación.

Las repoblaciones protectoras, con especies de crecimiento lento, se plantean para controlar la erosión del suelo en las superficies que se repueblan y para proteger a la cuenca vertiente de los efectos del geo-dinamismo torrencial. Normalmente se realizan en situaciones límites, extremando las medidas en la elección de especie (con criterios climáticos) y en la preparación del suelo, para aprovechar el escaso perfil edáfico y de capacidad de recogida del agua disponible. Si la repoblación prospera, la masa necesita agua para subsistir, pero sus sistemas radicales van generando un suelo forestal y éste permitirá en el futuro un mejor aprovechamiento del agua de las precipitaciones.

6. EJEMPLO: CORRECCIÓN Y RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DEL TORRENTE DE ARRATIECHO Y DE SU CUENCA VERTIENTE EN EL PIRINEO ARAGONÉS

6.1. Introducción: descripción de la cuenca y su situación al inicio del siglo XX

La cuenca vertiente al torrente de Arratiecho está situada en el Pirineo oscense en el término municipal de Bisecas, cerca de su núcleo de población y tiene una superficie de 1,6 Km². Morfológicamente es una típica cuenca torrencial de montaña, en la que se diferencian su área de recepción, su garganta y su cono de sedimentación (Figura 2 y Figura 4, izquierda). Su cota máxima y mínima son 1667 m y 860 m y su pendiente media 52,81 %. La longitud del torrente es de 2,74 Km, con una pendiente media 0,30 m·m⁻¹. En sus suelos predominan los Flysch coluviales, pero en su vertiente noreste presenta un pequeño manto de depósitos morrénicos que ocupa unos 0,06 Km².

Al comienzo del siglo XX la cuenca estaba deforestada, con sus suelos degradados y presentaba serios síntomas de inestabilidad, con riesgo de desplazamiento aguas abajo de la masa de terreno afectada por la dinámica torrencial, que se activaba cuando ocurrían en la cuenca precipitaciones torrenciales (Figura 4, derecha). En el torrente sus crecidas causaban una fuerte erosión en su lecho y el consiguiente transporte de los sedimentos arrancados al mismo aguas abajo, junto con los procedentes de la erosión en su cuenca vertiente y conducidos hasta él por las escorrentías de ladera; hasta alcanzar el flujo el área dominada, donde se expandía y depositaba los sedimentos a modo de cono de sedimentación, para después recogerse en su canal de desagüe y descargar en el río Gállego, al que el torrente de Arratiecho es tributario, originando múltiples cortes en la carretera N-260 (Figura 5) que

atraviesa su cono de sedimentación y aislando a la población de Biescas de los núcleos de población situados al este del mismo; además de causar daños en las áreas dominadas de la cuenca dedicadas a cultivos y pastizales.

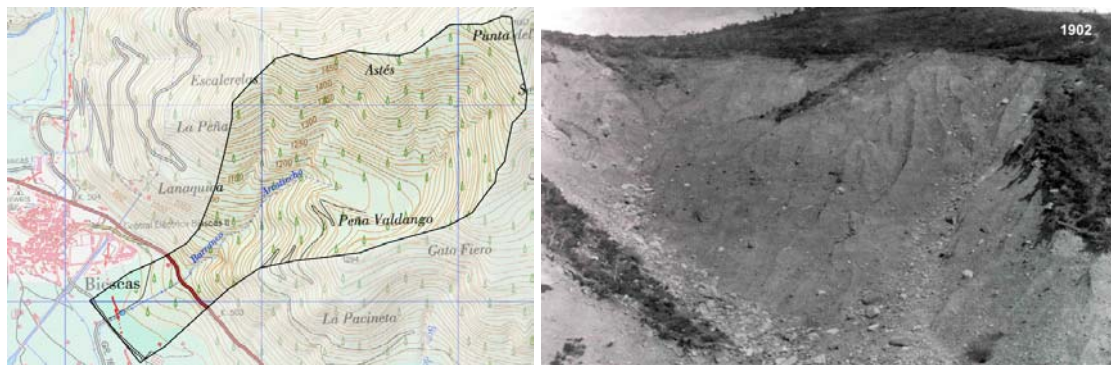


Figura 4. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho. Izquierda: límites de la cuenca destacando su proximidad al núcleo de población de Biescas y el paso por su área dominada de la carretera N-260. Derecha: cabecera de la cuenca en 1902, antes de iniciar las actuaciones para su restauración (Fotografía del archivo del INIA, 2004).



Figura 5. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho. Izquierda: trabajos de encauzamiento y canalización en el primer tramo del cono de sedimentación del torrente ejecutados por la VI División Hidrológico-Forestal para asegurar el servicio de la carretera N-260. Derecha: publicación en un diario regional de las obras realizadas. (Fotografías procedentes del archivo del INIA, 2004).

6.2. Obras y trabajos de corrección del torrente de Arratiecho y de restauración hidrológico-forestal de su cuenca vertiente

Ante esta situación la VI División Hidrológico-Forestal, operativamente ubicada en Huesca, ejecutó entre 1901-05 las obras de corrección del torrente de Arratiecho y las obras y trabajos de restauración hidrológico-forestal de su cuenca vertiente, proyectado y dirigido por el Ing. de Montes D. Benito Ayerbe

El proyecto se centró fundamentalmente en el control de la erosión remontante, que la dinámica geo-torrencial del torrente imprimía a toda la cuenca, cuando sobre ella incidían eventos torrenciales. Para ello estableció el sistema apropiado para regular la circulación del flujo por el torrente en tales situaciones; que consistió en una acotación de la garganta del torrente con tres diques transversales (que denominó de primer orden, por su función estratégica y su mayor tamaño); proyectándose el tramo situado aguas arriba del primero y los

tramos comprendidos entre éste y los dos diques siguientes con una pendiente de equilibrio determinada para su caudal de proyecto. Dicho caudal se adecuó al generador del lecho en el tramo en cuestión para situaciones de crecidas previsibles. Los diques comentados se muestran en las imágenes de la Figura 6.

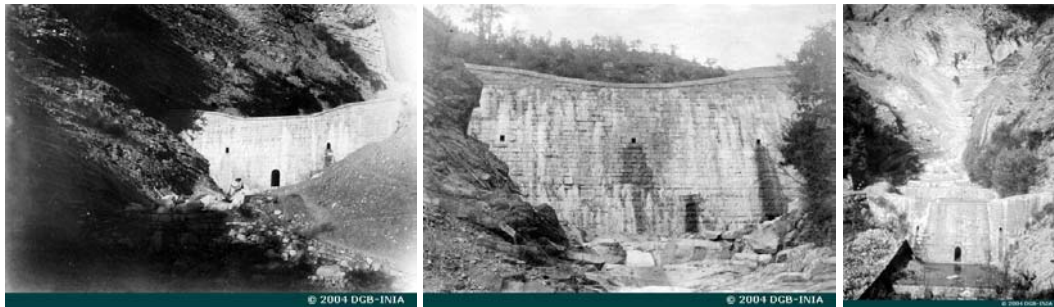


Figura 6. Diques de mampostería hidráulica en la garganta del torrente de Arratiecho en 1904. Izquierda: Dique de primer orden núm. 1; Centro: Dique de primer orden núm. 2; Derecha: Dique de primer orden núm. 3, junto con otros diques de segundo orden, situado en el vértice del cono de sedimentación del torrente de Arratiecho. (Fotografías procedentes del archivo del INIA, 2004)

Por otra parte, como el estado de degradación en el área de recepción del torrente había alterado casi por completo su red de drenaje, el proyecto estableció un sistema de nivelación (abancalado) y drenaje a modo de *espina de pescado*, que permitiera recoger las escorrentías directas de la cuenca y descargarlas al torrente de Arratiecho de un modo controlado, como aparece en la Figura 7, que refleja el estado en que se encontraban estos trabajos en 1910, cuando empezaba a surtir sus efectos la labor realizada. Con esta medida, a la vez que se conseguía una evacuación ordenada de los volúmenes de agua disponibles en la cuenca en momentos torrenciales y post-torrenciales; se evitaba también la erosión de sus suelos por acción de las escorrentías, que con anterioridad a la ejecución del proyecto circulaban descontroladas ladera abajo.

El proyecto diseño y se construyó también un canal escalonado atravesando el cono de sedimentación del torrente; para descargar sus caudales de crecida al río Gallego, evitando su expansión y divagación por las tierras colindantes; es decir, para estabilizar el cono de sedimentación y garantizar el tránsito por la carretera N-260 a la salida de Biescas (Figuras 5 y 8).

La rehabilitación de la cuenca del torrente de Arratiecho se completó con la reforestación de toda la vertiente directa al mismo, aproximadamente el 50 % de la cuenca. La especie principal utilizada fue el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), pero en las zonas de cotas más bajas se empleó también el quejido (*Quercus faginea*) y en las márgenes de los cursos de drenaje de la cuenca, especialmente del torrente de Arratiecho, y a los pies de la mayor parte de las obras hidráulicas se introdujeron plantones de aliso (*Alnus glutinosa*) para sujetar los suelos. Cabe señalar que cuando entre 1901-04 se reforestan las vertientes directas al torrente de Arratiecho, lo que se pretendía era estabilizar las tierras situadas en el escenario de la restauración, donde se concentraban las obras hidráulicas de corrección (Figura 7); pero con la reforestación se protegía también, además de las laderas que habían sido niveladas y drenadas, las áreas dominadas de la cuenca, ocupadas en su mayor parte por cultivos y pastizales y que incluso actualmente, más de cien años después, continúan como pastizales.



Figura 7. *Cabecera de la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en 1910, cuando las obras hidráulicas de corrección del torrente y las medidas de rehabilitación de su cuenca comenzaban a atemperarse. Posteriormente, tras su consolidación, han aportado un alto grado de protección y naturalización, conforme a lo previsto en el esquema restaurador. (Fotografías procedentes del archivo del INIA, 2004).*

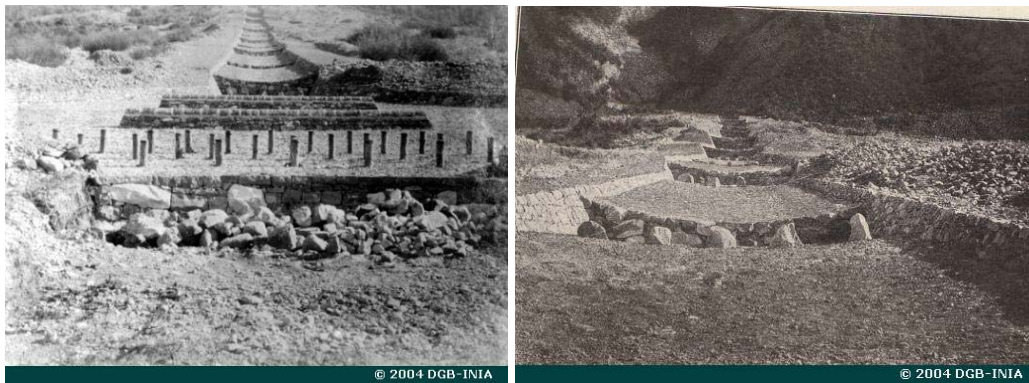


Figura 8. *Dos vistas del segundo tramo del canal escalonado que atraviesa el cono de sedimentación del torrente de Arratiecho en 1904. (Fotografías procedentes del archivo del INIA, 2004).*

6.3. Resultados ciento ocho años después de la corrección del torrente de Arratiecho y de la restauración hidrológico-forestal de su cuenca vertiente

Utilizando algunas imágenes seleccionadas, se muestran los resultados de la revisión de campo, efectuado durante el invierno y la primavera de 2012, del estado actual de las obras del proyecto de corrección del torrente de Arratiecho y de las obras y trabajos restauración hidrológico-forestal de su cuenca vertiente efectuados entre 1901-04, para lo que se establece el orden siguiente: *a)* Se comenta inicialmente la situación general de la cuenca, prestando especial atención a su nueva cubierta forestal, *b)* a continuación se muestra el estado de las obras hidráulicas de corrección; diferenciando las que se ejecutaron en la garganta del

torrente, de las que se llevaron a cabo en sus laderas vertientes y en el resto de los canales de drenaje; *c)* finalmente se aportan las imágenes del canal escalonado de tramos erosionables que, discurriendo por el eje del cono de sedimentación del torrente de Arratiecho, se dirige hacia curso del río Gállego.

a) La Figura 9 muestra la cuenca del torrente de Arratiecho en marzo de 2012, que tiene una superficie arbolada del 80 %. La mitad de este arbolado procede de las reforestaciones llevadas a cabo en las áreas más vulnerables al geo-dinamismo torrencial durante la ejecución del proyecto entre 1901-04; la otra mitad se debe a una política permisiva con la regeneración de la vegetación climática. El 20 % restante del área de la cuenca, que corresponde a las zonas de menor pendiente, se ubica en su mayor parte en su área dominada y está dedicada a pastizales.



Figura 9. *Panorama de la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en marzo de 2012. Se aprecia en el centro de la misma el cauce del torrente y las superficies repobladas con Pinus sylvestris en su vertiente directa (color verde oscuro); en el resto de la cuenca predomina la vegetación natural climática. (Esta imagen se corresponde con la imagen de la Figura 7).*

b) Las tres imágenes de la Figura 10 muestran en marzo de 2012 los tres diques de mampostería hidráulica de primer orden, levantados transversalmente al eje del torrente de Arratiecho en la garganta de su cuenca vertiente, en el mismo orden en que aparecen en las imágenes de la Figura 6 que corresponden al año 1904. Las imágenes superiores de la Figura 11 ofrecen detalles del estado que presentan en la misma fecha, marzo de 2012, los trabajos de nivelación realizados en la vertiente directa al torrente de Arratiecho en los primeros años del siglo XX y las imágenes inferiores corresponden al tramo encauzado de dicho torrente aguas abajo del dique de mampostería hidráulica de primer orden número 3, el ubicado en el vértice del cono de sedimentación del torrente.

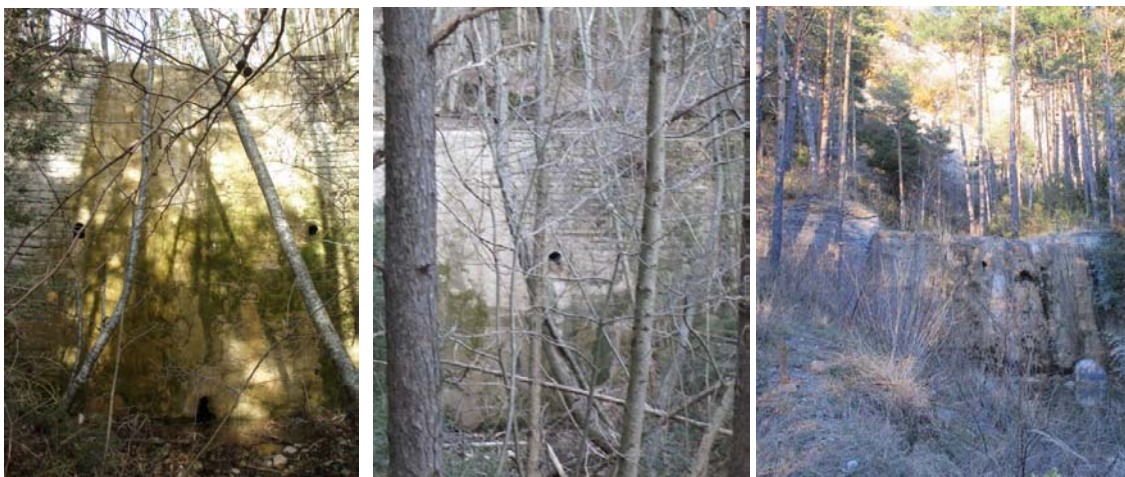


Figura 10. Estado que presentan los tres diques de mampostería hidráulica de primer orden, ubicados en la garganta del torrente de Arratiecho, en marzo de 2012 (el orden de aparición de los diques es el mismo que el de la Figura 6)



Figura 11. Imágenes superiores: Detalles del estado que presentan en marzo de 2012 los trabajos de nivelación del terreno realizados en la vertiente directa al torrente de Arratiecho entre 1901-04. Imágenes inferiores. Izquierda: dique de mampostería hidráulica de primer orden número 3, situado en el vértice del cono de sedimentación del citado torrente. Derecha: tramo encauzado del torrente en cuestión aguas abajo del dique de mampostería hidráulica de primer orden número 3, que aparece al fondo.

c) Las imágenes de la Figura 12 muestran en marzo de 2012 el canal escalonado de tramos erosionables, que establece el eje del cono de sedimentación del torrente de Arratiecho, en la sección donde le atraviesa la carretera N-206. La fotografía izquierda está tomada hacia aguas arriba (prácticamente desde el mismo lugar en el que se tomaron las fotografías de la Figura 5) y representa la continuidad de la imagen inferior derecha de la Figura 11. La fotografía derecha muestra el canal aguas abajo de la carretera, al fondo de la misma se encuentra el río Gállego. El canal presenta el aspecto de haber sido limpiado recientemente, que contrasta con el estado que presenta el tramo superior del mismo que aparece en la imagen inferior derecha de la figura anterior.



Figura 12. Estado en marzo de 2012 del canal escalonado de tramos erosionables, construido en 1904, que discurre por el eje del cono de sedimentación del torrente de Arratiecho para dirigirse al curso del río Gállego, en la sección que le atraviesa la carretera N-206, tras haber sido limpiado recientemente. Imagen izquierda: el canal visto hacia aguas arriba desde la carretera N-206 (esta imagen se corresponde con las fotografías de la Figura 5). Imagen derecha: el mismo canal inmediatamente aguas abajo de la citada carretera.

7. CONCLUSIONES

Es evidente que este documento da lugar a dos tipos de conclusiones: *a)* unas generales relativas a la incidencia del bosque en los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca vertiente y su papel protector de la misma ante el geo-dinamismo torrencial y de garante de su sustentabilidad a medio y largo plazo y *b)* otras específicas que se refieren directamente a la situación del torrente de Arratiecho y su cuenca vertiente.

7.1. Conclusiones generales

Al inicio del Proyecto EPIC FORCE (Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt - Políticas basadas en la evidencia científica para la gestión integrada de cuencas hidrográficas forestadas frente a precipitaciones extremas y fusiones repentinas del manto de nieve) su coordinador el Dr. **J. C. Bathurst** planteó tres cuestiones: *a)* ¿Interviene la gestión forestal en el comportamiento de las cuencas hidrográficas?; *b)* ¿Puede resultar el bosque beneficioso, rentable y efectivo para la cuenca vertiente? y *c)* ¿Qué consideraciones físicas se deben plantear al analizar los efectos del bosque en los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca hidrográfica?. Nuestro

equipo de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), como responsable de trasladar los resultados científicos al campo de las aplicaciones aportó las siguientes respuestas:

a) La gestión forestal es un instrumento que maneja el bosque a lo largo del tiempo, luego interviene en los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de la cuenca vertiente.

b-1) El bosque bien conservado es siempre beneficioso, porque: 1) Contribuye a aumentar la porosidad del suelo y con ello a regular la lámina de escurrido y a moderar los flujos de los cauces que drenan por la cuenca; 2) Controla la erosión hídrica, porque el suelo forestal presenta una cubierta de humus y hojarasca que amortigua el impacto de las precipitaciones y una rugosidad que limita la velocidad de la escorrentía; 3) Ambos efectos contribuyen a reducir la emisión de sedimentos por la cuenca y a moderar el geo-dinamismo torrencial en la misma. 4) Aunque el arbolado tenga un elevado consumo de agua por transpiración cuando se encuentra en su fase de mayor crecimiento, que dependiendo de la especie y del clima de la estación varía entre 10-20 años; pasado este periodo reduce su consumo hídrico conforme envejece la masa, hasta establecer una situación de equilibrio con el medio; que se identifica con el estado climácico o pseudo-climácico, que puede considerarse que es el que mejor aprovecha la energía que recibe de la naturaleza y por tanto el más estable.

b-2) La rentabilidad obliga a un análisis económico de las posibilidades del bosque para el cometido en cuestión y de los beneficios que aporta en tal sentido, en relación con la inversión que supone mantenerlo (y de generarlo, tratándose de reforestaciones). Todo esto es complejo aunque abordable; pero respecto al control del geo-dinamismo torrencial su rentabilidad es manifiesta; tanto más, cuanto que el bosque cumple mejor con este objetivo cuando se ubica en terrenos de mayores pendientes y en áreas dominantes de la cuenca, en los que agrónomicamente representa el mejor uso. Por tanto, en una primera aproximación, el bosque es rentable como regulador del geo-dinamismo torrencial.

b-3) En cuanto a su efectividad. Si se trata de eventos torrenciales ordinarios lo es. Ante eventos extremos, aunque siempre resulte beneficioso, puede no alcanzar la efectividad plena; pero en cualquier caso contribuye a reducir la intensidad de los procesos geo-torrenciales. En este sentido, *se puede comparar con el cinturón de seguridad en un vehículo, la seguridad no depende exclusivamente de él, pero no se cuestiona su uso.*

c) El ciclo del agua y el de los sedimentos en la cuenca está supeditado a las ecuaciones físicas de continuidad y del movimiento. El bosque incide en ambas, amortiguando sus efectos. 1) Algunas investigaciones han prestado mayor atención a la ecuación de continuidad y sus conclusiones se han especializado en los efectos de las cubiertas vegetales en el aprovechamiento del agua como recurso. 2) Otras investigaciones, se han centrado casi en exclusiva en la erosión del suelo y la degradación de la cuenca hidrográfica, lo que les ha conducido a dar mayor peso a la ecuación de la dinámica del agua. 3) Pero en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca se deben compaginar ambas para que resulte efectiva. 4) Además se debe contemplar la vegetación climácica como la formación más estable y que mejor utiliza la energía que recibe. El bosque constituye con frecuencia la vegetación climácica; por lo que ante su previsible sustitución se debe analizar el modo de aprovechar o disipar la energía que se libera, para que no incidir en un incremento del geo-dinamismo torrencial.

A todo ello cabe añadir que la ordenación agro-hidrológica debe atender las necesidades de la población; luego, hay que compaginar el bosque con otros usos del suelo que le proporcione

los medios de sustento; reservando al bosque la función de infraestructura para: *a)* Proteger a la cuenca ante eventos torrenciales; *b)* Evitar su degradación física; *c)* Mantener su equilibrio biológico.

7.2. Conclusiones específicas relativas al torrente de Arratiecho y su cuenca vertiente

Ciento ocho años después de finalizadas las obras y trabajos de corrección del torrente de Arratiecho y de la restauración hidrológico-forestal de su cuenca vertiente en 1904, se constata su efectividad; pues la frecuencia e intensidad con la que se ha desencadenado el geo-dinamismo torrencial en esta cuenca desde entonces, se ha reducido notablemente; es decir, los riesgos de deslizamientos superficiales en el área dominante o de cabecera de la cuenca y de aterramientos en su área dominada o cono de sedimentación se han reducido y se encuentran prácticamente controlados.

Pero la protección nunca será completa, porque los eventos que provocan el geo-dinamismo torrencial en una cuenca son aleatorios y siempre puede surgir un evento extremo incontrolable; por ejemplo, en el año 1997 una avenida torrencial cortó la carretera N-260, pero el depósito de sedimentos que produjo fue moderado y se pudo abrir al tránsito en poco tiempo.

Por ello, resulta totalmente necesario completar la labor de protección a lo largo del tiempo, con la revisión y el mantenimiento adecuado y periódico de las obras construidas y la aplicación de los trabajos selvícolas pertinentes a las masas forestales generadas con el proyecto; para que el esquema protector establecido con el mismo, que hasta la fecha el tiempo lo ha ido consolidando; no se invierta en el futuro por la falta de conservación de las obras hidráulicas y de mantenimiento de la reforestación, que conduzca a su deterioro y a la pérdida de sus características protectoras.

El resultado conjunto de la ejecución y posterior consolidación a través del tiempo del proyecto corrección del torrente de Arratiecho y de la restauración hidrológico-forestal de su cuenca está perfectamente integrado en el paisaje; pudiéndose considerar, a pesar del reducido tamaño de su cuenca vertiente, como una de las actuaciones más conseguidas de la restauración hidrológico-forestal en España; además gracias al mismo se detuvo la degradación de la cuenca y se alejó de ella el riesgo de desertificación.

Pero el paso del tiempo ha deteriorado algunas obras, lo que se hace necesario analizar su efectividad actual, principalmente frente a eventos extremos, y realizar una labor de mantenimiento y reconstrucción de las mismas por un doble motivo: *a)* para mantener la función de protección sobre los bienes amenazados; y *b)* para preservar el patrimonio que significan estas obras. Nunca se debe olvidar que el objetivo principal que motivó la ejecución del presente proyecto fue *la protección del área dominada de la cuenca*; lo que obliga a tener en cuenta que, por encima de cualquier otra consideración, el torrente debe tener asegurado su recorrido, cualquiera que sea el evento torrencial que provoque su crecida; valor que al ser incierto, recomienda realizar un seguimiento del torrente.

AGRADECIMIENTOS

Este documento recoge la experiencia recibida por nuestra Unidad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la UPM, de la labor desarrollada

por los Ingenieros de Montes en su más de siglo y medio de ejercicio en el campo de la ordenación y restauración de cuencas hidrográficas, especialmente de las de montaña. Es difícil concebir una política forestal sin unos cuerpos de la administración encargados de esta tarea; aunque evidentemente hay aspectos de dicha política que trascienden de este ámbito. Por ello, mi primer reconocimiento lo dedico a los profesores de la Escuela de Montes. Drs. José María García-Nájera y Filiberto López Cadenas de Llano que fueron, además, excelentes profesionales.

Quiero reconocer al Proyecto EPIC FORCE (INCO-CT2004-510739 del 6º Programa Marco de la Comisión Europea), a su coordinador el Dr. Bathurst y al resto de los componentes europeos y latinoamericanos que lo hicimos posible; no tanto porque cambiaran mi modo de concebir la ordenación y restauración de cuencas de montaña, sino porque me ayudaron a transmitirlo mejor. También agradezco a mis compañeros Ingenieros de Montes Francisco y Santiago Fábregas y Rocío Hurtado, que en diferentes etapas de mi vida me mostraron el Pirineo Aragonés en la faceta comentada en este trabajo y también a descubrir el románico oscense; gracias a ellos he podido redactar el apartado 6 de este documento y, finalmente, a los compañeros que tengo más cerca en la E. T. S. de Ingenieros de Montes, el Dr. José Carlos Robredo y Ing. de Montes Pablo Huelin, con los que comparto el trabajo diario.

7. BIBLIOGRAFÍA

ANDRÉASSIAN, V. (2004) Waters and Forests: from historical controversy to scientific debate, *Journal of Hydrology* num. 291, pp 1-27

BECQUEREL, A. C. (1853) *Des climats et de l'influence qu'exercent les sols boisés et non boisés*, Firmin Didot frères, 366 pp., Paris.

BELGRAND, E. (1853) De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. *Annuaire de la Société Météorologique de France* 1, pp. 176-193.

BRUIJNZEEL, L. A.; BONELL, M.; GILMOUR, D. A.; LAMB, D. (2005) Conclusion: Forests, water and people in the humid tropics: an emerging view, Ed: BONELL, M. & BRUIJNZEEL, L. A., *Forests, water and people in the humid tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management*, pp. 906-925, Cambridge University Press UNESCO.

CEBALLOS, L. & ORTUÑO, F. (1952) El bosque y el agua en Canarias, *Montes*, núm.48

FÁBREGAS REIGOSA, S. (2011) Metodología para la gestión de montes protectores y del estado y efectividad de las obras de ingeniería de riesgos naturales. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. Gobierno de España (inédito).

FÁBREGAS REIGOSA, S.; MINTEGUI AGUIRRE, J. A.; HURTADO ROA, R. & ROBREDO SÁNCHEZ J. C. (2012) Los efectos del bosque en las cuencas de montaña ante la incidencia en ellas de eventos torrenciales. Su estudio en la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en el Pirineo Aragonés. *Revista Forestal Española*, en prensa.

GARCÍA NÁJERA, J. M. (1943, 1962) *Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes*, IFIE, 297 pp., Madrid.

HIBBET, A. R. (1967) Forest treatment effects on water yield. In Sopper W. E. Lull H. W. (eds.) *Forest Hydrology, Proceedings of a National Science Foundation at Advanced Science Seminar*, Pergamon Press, Oxford, pp. 527-543.

INGWERSEN, J. B. (1985) Fog drip, water yield, and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed, Oregon, *Water Resources Bulletin* num. 21 (3), pp. 469–473.

LENZI, M. A.; D'AGOSTINO, V. & SONDA, D. (2000) *Ricostruzione Morfologica e Recupero Ambientale dei Torrenti*, 208 pp., Editoriale Bios, Italy.

LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. (1988) *Corrección de torrentes y estabilización de cauces*, Colección FAO, Fomento de tierras y aguas, 182 pp., Roma.

MATTHIEU, A. (1878) *Météorologie comparé agricole et forestière*, 70 pp., Imprimerie Nationale, Paris

MEUNIER, M. (1991) *Éléments d'hydraulique torrentielle*, Etudes de Montagne. 1, 278 pp., CEMAGREF, Grenoble (France).

MINTEGUI AGUIRRE, J. A. & LÓPEZ UNZU, F. (1990) *La Ordenación agro-hidrológica en la planificación*, Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco, 306 pp., Vitoria.

MINTEGUI AGUIRRE, J. A.; DE SIMÓN NAVARRETE, E.; GARCÍA RODRÍGUEZ, J. L. & ROBREDO SÁNCHEZ, J. C. (1993) *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*, Servicio de Publicaciones de la Junta de Andalucía, 22/93 Informaciones Técnicas, 325 pp., 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*, 176 pp., Documentos Técnicos del PHI-LAC núm. 13. UNESCO. Montevideo, Uruguay. <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001592/159245s.pdf>

SURREL, A. (1841) *Etude sur les torrents des Hautes Alpes*, Carilian-Goeury et Victor Dalmont, 283 pp., Paris.

TRAGSA-TRAGSATEC, VARIOS AUTORES, Director coordinador LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. (1994, 1998) *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y Control de la erosión. Ingeniería Medioambiental*. 929 pp., Ministerio de Medio Ambiente, Mundi Prensa. Madrid.

THIERY, E. (1891, 1914) *Restauration des montagnes, correction des torrents et reboisement*, Librairie Polytechnique Ch. Beranger, 480 pp., Paris et Liege.

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 Ecology and Management*, num. 143, pp. 13–26.