



INCO-CT2004-510739

## EPIC FORCE

### **Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt**

**ADECUACIÓN DE LAS ACTUACIONES DE ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LAS CUENCAS VERTIENTES, A LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS MISMAS Y A SUS PREVISIBLES COMPORTAMIENTOS ANTE LA INCIDENCIA EN ELLAS DE EVENTOS TORRENCIALES**

**Juan Ángel Mintegui Aguirre & José Carlos Robredo Sánchez**  
**Universidad Politécnica de Madrid; E. T. S. Ingenieros de Montes,**  
**Departamento de Ingeniería Forestal; Unidad de Hidráulica e Hidrología. Madrid**  
**(España)**

## INDICE

1.	Las razones para la ordenación y restauración de las cuencas vertientes	2
1.1.	Descripción del fenómeno del geo-dinamismo torrencial	2
1.2.	Adopción del concepto de aprovechamiento sustentable	3
2.	Contenidos de la ordenación y la restauración de una cuenca vertiente	3
2.1.	Objetivos de la ordenación y restauración de una cuenca	3
2.2	La influencia del bosque en el ciclo del agua y en el control del geo-dinamismo torrencial en la cuenca. - Su empleo en la ordenación y restauración de la cuenca	4
2.3.	Conceptos usados en la ordenación y la restauración de cuencas	5
3.	Actuaciones hidrológico-forestales en cuencas vertientes que presentan diferentes escenarios naturales	7
3.1.	Análisis del escenario I.-A	10
3.2.	Análisis del escenario I.-B	18
3.3.	Análisis del escenario II.-A	21
3.4.	Análisis del escenario II.-B	25
4.	Conclusiones finales	27
5	Bibliografía	27

## RESUMEN

El texto establece el significado físico y socio-económico de la cuenca vertiente, al tiempo que muestra los efectos que los eventos torrenciales le pueden causar cuando inciden en ella y desencadenan el fenómeno del geo-dinamismo torrencia. Ante esta situación se justifica la necesidad de ordenar e incluso restaurar la cuenca vertiente, para conseguir los siguientes objetivos: 1) amortiguar en lo posible los efectos del geo-dinamismo torrencia en la misma y 2) garantizar su aprovechamiento sustentable.

A continuación se hace una breve revisión de los efectos del bosque en la ordenación y restauración de una cuenca vertiente; porque si bien todas las cubiertas de vegetación condicionan el comportamiento del ciclo del agua en la cuenca, el arbolado representa además una infraestructura de sujeción del suelo y de amortiguamiento del geo-dinamismo torrencia en la misma; aunque normalmente la restauración de una cuenca se suele complementar con obras hidráulicas, para asegurar en ella el control del flujo del agua, especialmente en sus cauces de evacuación. Asimismo se explican los conceptos utilizados en la ordenación de la cuenca y el significado que se aplica a su restauración hidrológico-forestal.

Se concluye analizando los distintos escenarios que se pueden presentar en los diferentes tipos de cuencas vertientes, cuando se pretende ordenarlas con criterios agro-hidrológicos y se plantean en ellas las actuaciones para llevar a cabo su restauración hidrológico-forestal.

### 1. LAS RAZONES PARA LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LAS CUENCAS VERTIENTES

Las cuencas vertientes de montaña constituyen unidades de estudio y gestión. Lo primero porque en ellas se pueden analizar los ciclos del agua y de los sedimentos enmarcados directamente en su territorio, que adquiere la máxima relevancia cuando sucede el fenómeno del geo-dinamismo torrencia, causado por las precipitaciones torrenciales extremas, fusiones repentinas del manto de nieve o desprendimientos de aludes. Lo segundo porque las cuencas se encuentran normalmente pobladas y sus habitantes necesitan de sus recursos para desarrollarse. El agua y el suelo constituyen los principales recursos que dispone la cuenca, que a su vez son los más necesarios para su población.

Por tanto, para proteger a la cuenca de los efectos que le puede ocasionar el geo-dinamismo torrencia, producido en ella por los eventos torrenciales, así como para asegurar el aprovechamiento eficaz de sus principales recursos (agua y suelo), se debe atender al comportamiento físico de todos los componentes de la cuenca antes las diferentes circunstancias que se presentan en ella y en función del mismo establecer su ordenación.

#### 1.1. Descripción del fenómeno del geo-dinamismo torrencia

Cuando sobre una cuenca vertiente inciden precipitaciones torrenciales extraordinarias, el comportamiento en ella del ciclo del agua se intensifica, poniendo en movimiento en un corto intervalo de tiempo un importante volumen de agua y activando el fenómeno del *geo-dinamismo torrencia*; que se manifiesta, además de por un incremento del caudal líquido en el ciclo del agua, por la aparición de procesos de erosión del suelo en la cuenca vertiente por el efecto de las precipitaciones y de las escorrentías de ladera; la erosión en los cauces drenaje por la abrasión de los mismos por las corrientes de la avenida; el transporte de los materiales

erosionados por las escorrentías de ladera y por los flujos de avenida y, finalmente, el depósito de los sedimentos transportados, cuando la corriente pierde energía y, por tanto, capacidad para mantenerlos en ella; pudiendo generar conos de sedimentación cuando se trata de cursos torrenciales, o distintas formas de depósitos aluviales cuando se refiere a ríos de llanura. La erosión en la cuenca se puede manifestar también por deslizamientos de laderas en las áreas más vulnerables, afectando a la estabilidad de los terrenos y a la seguridad de sus habitantes y sus bienes.

Pero también los eventos torrenciales ordinarios, aunque sus efectos sean más moderados, pueden causar pérdidas de suelo y de cosechas, por tanto, reducen los recursos naturales de la cuenca y empobrecen a sus moradores, especialmente cuando no se adoptan medidas para controlar dichos efectos y la cuenca entra en un proceso de paulatino deterioro.

## **1.2. Adopción del concepto de aprovechamiento sustentable**

Para el término aprovechamiento o desarrollo sustentable existen distintas definiciones; pero, para lo que a continuación se refiere, se considera como tal, aquel que, aprovechando sus habitante sus recursos naturales (especialmente el agua y el suelo), la cuenca pueda seguir manteniendo su capacidad biológica para recuperar su cubierta climática, al menos en alguno de sus estadios intermedios, evitando de este modo su posible desertificación.

## **2. CONTENIDOS DE LA ORDENACIÓN Y LA RESTAURACIÓN DE UNA CUENCA VERTIENTE**

El esquema de la ordenación de una cuenca se inicia constatando los ciclos del agua y de los sedimentos en la misma, por ello se asumen las ecuaciones físicas que rigen el movimiento del agua, es decir, la ecuación de continuidad (conservación de la masa) y las ecuaciones de la dinámica (la de la conservación de la cantidad de movimiento y la de la conservación de la energía); pero, además, para adecuarse a las especificidades de la cuenca, se debe atender también a otras dos cuestiones: *a)* el conocimiento del estado físico de la cuenca y *b)* la previsión de su comportamiento ante diferentes tipos de eventos que se produzcan en la misma, especialmente los torrenciales. En este contexto resulta fundamental diferenciar en la cuenca vertiente sus áreas dominantes o de cabecera de sus áreas dominadas o valles, porque el mero gradiente de altitud representa un factor esencial en el movimiento del agua y de los sedimentos. A lo que se añade que las áreas dominantes, por sus mayores altitudes y porque con frecuencia presentan pendientes elevadas, son las más propensas al arranque del geo-dinamismo torrencial, las fusiones repentinas del manto de nieve o el desprendimientos de aludes; mientras que las áreas dominadas son las principales receptoras de los efectos provocados por dichos fenómenos en la cuenca, que pueden derivar en inundaciones y aterramientos de las áreas anegadas e impactos por deslizamientos de tierras o aludes, con los consiguientes daños producidos por ellos.

### **2.1. OBJETIVOS DE LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN DE UNA CUENCA**

Se trata de conseguir: 1) La protección de la cuenca ante los daños que le pueda ocasionar el geo-dinamismo torrencial provocado por las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias, las repentinas fusiones del manto de nieve o los aludes, que sucedan en la misma y 2) El mejor aprovechamiento de los recursos agua y suelo en la cuenca hidrográfica, es decir, su aprovechamiento sustentable.

## 2.2 LA INFLUENCIA DEL BOSQUE EN EL CICLO DEL AGUA Y EN EL CONTROL DEL GEO-DINAMISMO TORRENCIAL EN LA CUENCA. - SU EMPLEO EN LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LA CUENCA

La utilización de las cubiertas arboladas en la ordenación y restauración de una cuenca vertiente se fundamentan en una serie de evidencias científicas. A continuación se mencionan las de mayor repercusión por su implicación en el ciclo del agua, en el control de la erosión, en la conservación de suelos y en definitiva en la protección de la cuenca vertiente ante el geo-dinamismo torrencial.

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. Atendiendo únicamente al ciclo del agua en los momentos que sobre la cuenca inciden precipitaciones torrenciales, los bosques bien conservados presentan unos suelos más porosos que los agrícolas y por tanto con mayor capacidad de infiltración; además las copas de los árboles retienen una parte de las precipitaciones que llegan a la cuenca; ambos causas contribuyen a atenuar los efectos de las precipitaciones torrenciales y, en consecuencia, de las avenidas derivadas de ellas. Sin embargo, cuando las precipitaciones son muy intensas y prolongadas, una vez que el suelo forestal y la capacidad de retención del agua en el vuelo del arbolado se saturan, el efecto del bosque resulta poco significativo. Por tanto, los efectos del bosque son mayores 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.
3. Pero 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* (descrito en el apartado 1.1). El bosque actúa con efectividad en la amortiguación del fenómeno del geo-dinamismo torrencial, con una incidencia muy superior a la que tiene sobre los caudales líquidos considerados de forma aislada; porque al proteger al suelo de la cuenca reduciendo la erosión hídrica, disminuye también la emisión de sedimentos y el grado de aterramiento de las áreas de inundación de la cuenca. Lógicamente, su influencia disminuye conforme los eventos torrenciales resultan más extraordinarios y las cuencas vertientes presentan mayores superficies; pero en todos los casos sigue siendo muy importante.
4. 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.
5. Atendiendo a la influencia del bosque en los intervalos entre eventos torrenciales, el arbolado 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, lo que es especialmente significativo tratándose de repoblaciones forestales. Para climas templados y 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.

6. Pasado el periodo de máximo desarrollo vegetativo en los árboles, éstos reducen su consumo hídrico, que va descendiendo conforme se envejece la masa, hasta establecer un equilibrio con el medio. En dicha situación, que se puede identificar con el estado climáctico o pseudoclimáctico (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 y la que mejor protege al suelo.
7. Los bosques al aumentar la infiltración disminuyen la escorrentía; por ello, la tala del bosque incrementa las escorrentías, lo que en determinadas situaciones puede resultar beneficioso. Pero al aumentar las escorrentías, se acelera el ciclo del agua y con ello el ciclo de los sedimentos pues ambos actúan simultáneamente, lo que en las zonas más vulnerables de la cuenca puede causar un incremento de la erosión hídrica del suelo y un mayor riesgo de desencadenamiento del geo-dinamismo torrencial, aspecto que es preciso considerar en la ordenación agro-hidrológica de la cuenca, para no causar problemas graves de erosión que inutilicen determinados suelos de la cuenca para el futuro.
8. Además el bosque tiende a recuperarse en las zonas donde ha sido talado, siguiendo las distintas fases evolutivas de su serie climática, salvo que la acción repetida del hombre haya causado una degradación que impida su regeneración. Este efecto se debe impedir, porque es el primer síntoma del fenómeno de la desertificación; pero sobre todo se debe evitar en las zonas más vulnerables de la cuenca, como son los terrenos con pendientes elevadas ubicados en las áreas dominantes de la misma. En concreto, la capacidad del bosque tropical de invadir los terrenos de cultivos y pastizales abandonados es un factor muy importante a considerar en la ordenación de las cuencas tropicales.
9. En las ordenaciones de cuencas vertientes en Europa han desempeñado un papel esencial las *repoplaciones de cabecera con fines protectores*, realizadas sobre suelos pobres, sujetos a una fuerte erosión superficial, en los que el estado de los terrenos no era capaz de retener y almacenar el agua de lluvia. En tales circunstancias, el objetivo era la formación de suelo forestal que contribuyera a incremental las reservas hídricas de la cuenca.
10. Al respecto, se indica que en algunas áreas tropicales andinas de alta montaña el *pajonal del páramo*, formado sobre andosuelos muy higroscópicos, desempeña una protección semejante a las repoblaciones de cabecera de cuenca realizadas en Europa en el pasado, pues contribuye a regular las reservas de agua de la cuenca desde su cabecera. Por tanto su conservación en buen estado representa la mejor opción en la ordenación de la cuenca.
11. 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 infraestructura que le corresponde, que sirva: a) para proteger a la cuenca ante eventos torrenciales, b) para evitar su degradación física y c) para mantener su equilibrio biológico durante los periodos entre eventos torrenciales.

### **2.3. CONCEPTOS USADOS EN LA ORDENACIÓN Y LA RESTAURACIÓN DE CUENCAS**

Se han mencionado dos conceptos: la *ordenación* y la *restauración*; son diferentes pero están perfectamente definidos en el ámbito de las cuencas vertientes de montaña. Buscando una explicación histórica, se remonta al inicio de las obras hidráulicas de corrección de torrentes de montaña en la Europa del siglo XIX. Los ingenieros encargados de las mismas se percataron muy pronto que, para asegurar la efectividad en el tiempo de dichas obras, tenían que rehabilitar simultáneamente las cuencas vertientes a los torrentes corregidos. De este modo los términos *corrección de torrentes* y *restauración de cuencas de montaña* o simplemente *restauración de montañas* surgen simultáneamente. Como lo habitual en la

restauración de las cuencas de montaña era su repoblación forestal, en España se acuño la palabra *restauración hidrológico-forestal*, cuya acepción se fue ampliando conforme las cuencas vertientes objeto de restauración se extendían a mayores superficies y, por tanto, sobrepasaban su ámbito primitivo restringido a las montañas.

Antes de iniciar la corrección de un torrente y la restauración de su cuenca vertiente, se procedía a unos trabajos que se conocían como de *reconocimientos previos*, que consistían en un estudio del estado físico del torrente a corregir y de su cuenca vertiente y de su previsible comportamiento ante los aguaceros; a estos trabajos se les daba una gran importancia.

Al aumentar las superficies de las cuencas objeto de restauración hidrológico-forestal, los trabajos y obras en sus áreas de montaña o dominantes seguían contribuyendo a resolver los problemas de dichas zonas y a amortiguar los efectos del geo-dinamismo torrencial en el conjunto de la cuenca; pero quedaban por solventar los problemas específicos de carácter más agrícola de las áreas dominadas, tales como el control de la erosión en los suelos propiamente agrícolas, cuya solución no convenía plantearlo al margen de la restauración del conjunto de la cuenca. Para atender a todos estos aspectos desde la fase inicial de los trabajos de restauración de las áreas forestales de montaña, se planteó en la década de los setenta del siglo pasado la elaboración previa de la *ordenación agro-hidrológica* de las cuencas objeto de posteriores proyectos de restauración hidrológico-forestal (cuyas actividades continuaban centrándose en sus áreas dominantes), sustituyendo con ello a los trabajos de *reconocimientos previos* (**López Cadenas de Llano; Aguiló Bonnín**)

La *ordenación agro-hidrológica* se centra en el estudio del estado físico de la cuenca vertiente y en el análisis de su previsible comportamiento ante los eventos torrenciales, tanto ordinarios como extraordinarios, con el propósito de conocer cómo es realmente la cuenca y cómo se comporta; así como para prever su evolución y detectar sus carencias, a fin de proponer las medidas pertinentes para tratar de subsanarlas.

La *restauración hidrológico-forestal* implica llevar a cabo en la cuenca vertiente las medidas adoptadas en la *ordenación agro-hidrológica*, para protegerla de los daños que pudiera causarle el geo-dinamismo torrencial provocado por los eventos torrenciales o por la fusión repentina del manto de nieve, así como para asegurar su buen funcionamiento hidrológico y la correcta conservación de sus suelos en los períodos que transcurren entre eventos torrenciales.

El principal destinatario de este documento son las cuencas hidrográficas de América Latina. En algunas de estas cuencas su ordenación y restauración atiende a un objetivo único: la protección de sus áreas dominadas de los daños que pudiera causarle el geo-dinamismo torrencial motivado por los eventos torrenciales en las áreas dominantes; en este caso se trata de una *ordenación y restauración hidrológico-forestal*. Pero en mayor número de cuencas de montaña, sin renunciar el objetivo anterior, se debe plantear también el modo de compatibilizarlo con su aprovechamiento sustentable; con este enfoque resulta más razonable plantear primero una ordenación *agro-hidrológica* de la cuenca, en la que se tenga en cuenta la incidencia de los diferentes usos del suelo en la conservación de sus recursos naturales y, tras diagnosticar los problemas, redactar el proyecto de *restauración hidrológico-forestal*.

En las últimas décadas se habla cada vez más de *restauraciones hidrológico-ambientales* o de *restauraciones hidro-ecológicas*. La cuestión surge ante una mayor concienciación por la sociedad por preservar el medio ambiente, controlando un mayor número de factores que le condicionan: como los diferentes tipos de contaminantes; las urbanizaciones descontroladas,

edificadas en áreas vulnerables ante los efectos geo-torrenciales o en zonas que alteran sensiblemente el entorno paisajístico; la conservación de los hábitat naturales; la preocupación por las emisiones de gases de efecto invernadero; el cambio climático; entre otras cuestiones. Todas ellas son importantes, se deben de tener en cuenta y son asumidas cada vez con mayor interés por la sociedad. Pero este documento se limita a abordar la primera etapa en la ordenación y restauración de las cuencas vertientes de montaña de América Latina, apoyado en un esquema hidrológico sencillo basado en fundamentos físicos (aunque su elaboración haya requerido un modelado de mayor complejidad), con pleno respeto a los ecosistemas naturales de la región y atendiendo a los principales problemas planteados de seguridad y desarrollo sustentable y, por supuesto, planificando el trabajo de manera que resulte eficaz para orientar la resolución de los problemas actuales y plenamente abierto para incorporar las nuevas temáticas medioambientales que se demanden en el futuro.

### **3. ACTUACIONES HIDROLÓGICO-ForestALES EN CUENCAS VERTIENTES QUE PRESENTAN DISTINTOS ESCENARIOS NATURALES**

La Figura 1 muestra una síntesis de los efectos causados por el geo-dinamismo torrenciales en las diferentes fases de los recorridos de los ciclos del agua y de los sedimentos por la cuenca, desde el momento en el que la precipitación torrenciales incide en ella e inicia el proceso. De un modo genérico, las estrategias para atender a los citados efectos (que aparecen numerados en los diferentes cuadros de la Figura 1) son las siguientes:

- a. En relación con los efectos consignados en los cuadros **1, 2 y 4**, éstos se pueden mitigar actuando sobre la cuenca vertiente con repoblaciones forestales, control del pastoreo, pequeñas obras hidráulicas de control de la escorrentía superficial, medidas de conservación de suelos y prácticas de laboreo racional; dependiendo según las situaciones de las pendientes del terreno, de la posición altimétrica de las zonas afectadas y de las circunstancias concretas del lugar en cuestión.
- b. Respecto de los efectos del cuadro **5**, la forma más radical de controlarlos es mediante embalses de regulación. Es un procedimiento caro, complejo, con fuertes impactos sobre el territorio y no exento de ciertos riesgos; pero ha sido adoptada en determinadas circunstancias en países con tecnología avanzada y con recursos para realizarlo. Las restantes medidas pueden considerarse alternativas o complementarias y consisten en:
  - Proteger los márgenes del cauce en las secciones que corresponden a las zonas más pobladas o presenten cultivos de mayor valor económico o estratégico y dejar expandir a la corriente en las despobladas e improductivas, donde causen menos daños. Cuando los ríos son muy torrenciales estas medidas se deben completar con umbrales de fondo.
  - Como medida pasiva que atienda a la población: los sistemas de alerta y evacuación.
- c. En cuanto a los efectos del cuadro **6.a**, éstos se mitigan actuando en los cauces con técnicas de corrección de torrentes. Estas técnicas se extienden también al cuadro **7.a**.
  - Como medida pasiva que atienda la población: los sistemas de alerta y evacuación.

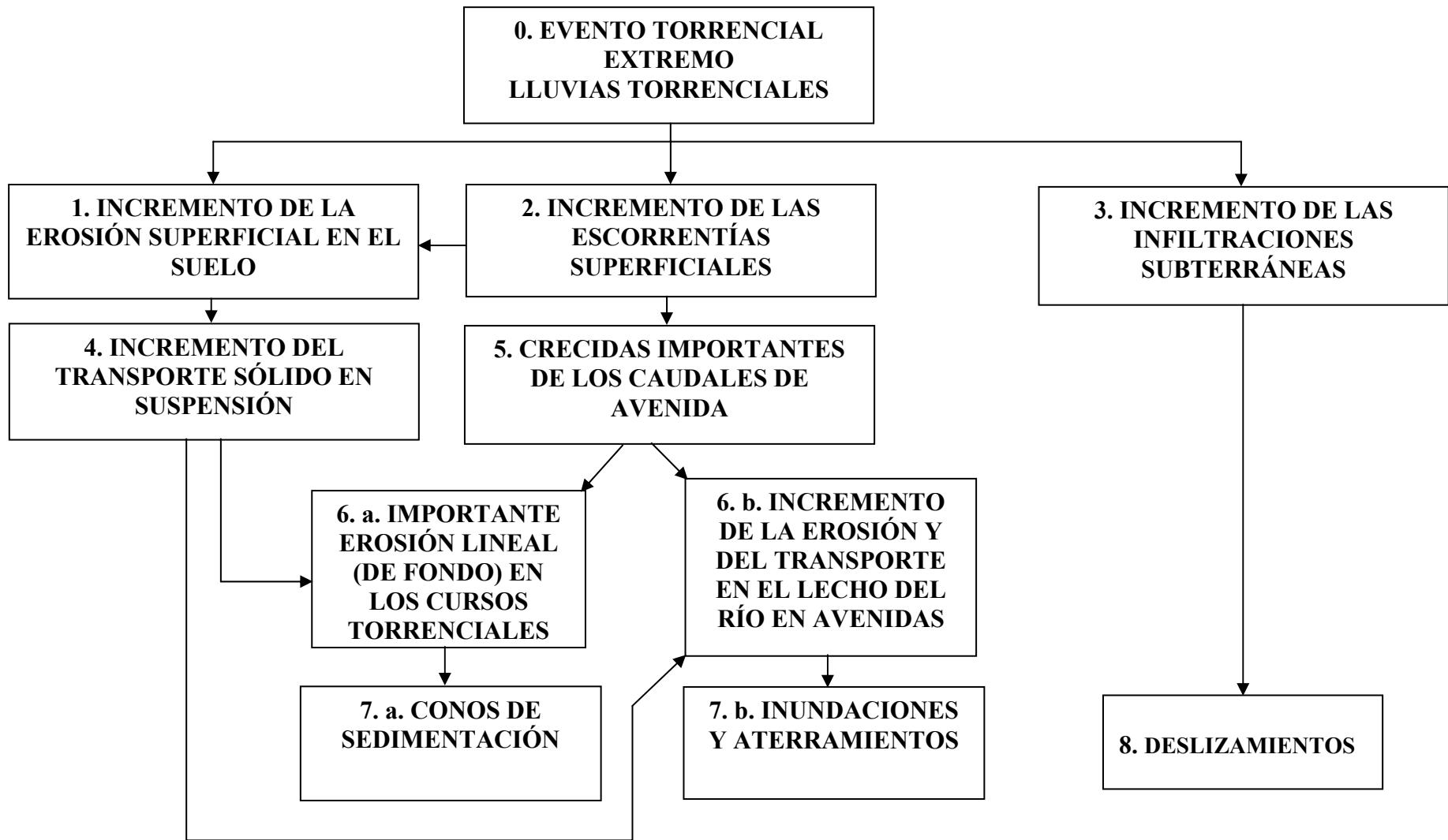


Figura 1. – Síntesis del impacto de los eventos extremos en las diferentes áreas de una cuenca hidrográfica

- d. En relación con los efectos del cuadro **6.b**, éstos se reducen con obras hidráulicas de protección de márgenes (escolleras, malecones, espigones, vegetación de riberas, la combinación de varias de ellas, etc.) Estas medidas trasladan el problema hasta la situación del apartado **7.b**, donde la solución es evitar que el agua se embalse, para lo que hay que buscarle una salida, en ocasiones difícil de encontrar, pero en todos los casos hay que evitar trabas y permitir su libre circulación hasta un cauce de mayor rango o directamente al mar. Además, se contempla con:
- Una estimación a través de modelos hidrológicos e hidráulicos y técnicas cartográficas de representación en el territorio de los límites previsibles del área de inundación.
  - Como medida pasiva que atienda a la población: los sistemas de alerta y evacuación.
- e. En relación con los efectos consignados en los apartados **3** y **8**, sólo se pueden abordar cuando se conocen las infiltraciones aguas arriba del área de deslizamiento, utilizando técnicas de desviación del flujo de filtración. Si el evento torrencial dura mucho tiempo, resulta imposible de impedir el deslizamiento. Se podría realizar una primera estimación del tiempo que puede mantenerse la ladera sin deslizar, pero la medida resulta muy imprecisa. En Europa hay situaciones en las que se ha desmontado la ladera cuando afecta a poblaciones en la zona dominada. Lo mejor es no asentar las poblaciones donde exista este riesgo. Además se deben considerar:
- No son suficientes en estos casos la utilización de los sistemas de alerta y evacuación de la población. La protección se debe asegurar de forma permanente.
  - Hay deslizamientos imposibles de prever, porque las filtraciones se realizan por primera vez en el lugar con ocasión de un evento extraordinario. Cuando son epiteliales (superficiales), aunque resulten muy aparentes, no son graves y se cicatrizan con el tiempo. Si son en profundidad o rotacionales, mucho más raros, son casi imposibles de prever y su corrección no se puede abordar con la restauración hidrológico-forestal de la cuenca.

Pero ante todo conviene señalar que cualquier actuación en una cuenca hidrográfica objeto de ordenación y restauración, no se puede sustraer de las características y del estado físico que ésta presenta. La matriz de la Tabla 1 define cuatro escenarios, para proponer en ellos las actuaciones pertinentes en función de los principales aspectos físicos de la cuenca vertiente.

Pendiente	Altitud	I. Áreas dominantes de la cuenca (cabeceras)	II. Áreas dominadas de la cuenca (valles)
A. Predominio de laderas con pendientes elevadas o incluso escarpadas. Pendiente media de la cuenca superior al 20 %		Escenario I-A	Escenario II-A
B. Abundancia de laderas con pendientes de suaves a moderadas. Pendiente media de la cuenca inferior al 20 %.		Escenario I-B	Escenario II-B

*Tabla 1. Distintos escenarios naturales en una cuenca hidrográfica ante su ordenación y restauración hidrológico-forestal.*

En cada uno de los cuatro escenarios de dicha matriz se consideran los siguientes aspectos:

1. Una somera descripción física del mismo.
2. Una breve descripción de la fenomenología geo-torrencial que puede afectar al escenario.
3. El esquema corrector para el escenario en cuestión, para el supuesto que el fenómeno geo-torrencial se desencadene, considerando tanto los criterios y objetivos de la corrección, como las propias técnicas utilizadas para tal fin.

Dentro de las técnicas se han diferenciado las que se refieren a:

- a. Los torrentes o cursos torrenciales
- b. La defensa ante el riesgo de aludes
- c. La corrección de las laderas vertientes en la cuenca hidrográfica
- d. El sistema corrector de los deslizamientos superficiales del terreno y
- e. La ordenación de los usos del suelo en función de las pendientes del terreno y de su posición altimétrica.

Además, en cada uno de los cuatro escenarios de la matriz anterior se han considerado las diferencias específicas establecidas por la altitud y especialmente por la línea conocida como *timber line*, que se define como la cota máxima en altitud hasta la que es posible la expansión de las cubiertas arboladas en espesura, que está fundamentalmente ligado a las condiciones térmicas que regulan el periodo vegetativo del lugar; por tanto restringe las posibilidades de utilización del arbolado en el control del geo-dinamismo torrencial en las áreas de su entorno y de cotas superiores a la misma.

### **3.1. ANÁLISIS DEL ESCENARIO I-A**

#### ***3.1.1. Descripción***

Áreas de montaña y de alta montaña con laderas de fuertes pendientes. Si además la litología del lugar presenta materiales erosionables o deslizantes, los torrentes del presente escenario acentúan su carácter geo-torrencial ante eventos extraordinarios tales como precipitaciones torrenciales o repentinias fusiones del manto de nieve.

Dentro de este escenario cabe diferenciar las superficies con altitudes superiores o en el entorno del *timber line*, de las que no alcanzan su cota. Las primeras no tienen asegurada la presencia del arbolado, quedando su protección condicionada a otros estratos de vegetación o bien sin protección alguna con el terreno prácticamente desnudo; mientras que las segundas pueden ser cubiertas por el bosque, siempre que dispongan de perfil edáfico suficiente; lo que permite configurar el sistema corrector de la cuenca en base al arbolado.

#### ***3.1.2. Fenomenología geo-torrencial***

La dinámica geo-torrencial puede llegar a ser muy intensa, sobre todo si se da la doble circunstancia de precipitaciones extraordinarias y terrenos de materiales deleznable, pudiéndose generar importantes erosiones superficiales en la cuenca y corrientes saturadas de sedimentos en los cauces; resultando muy importante el porcentaje de la descarga sólida próxima al lecho (caudal sólido de fondo).

En este escenario existe riesgos de desprendimiento de aludes en el invierno, en los terrenos con pendientes superiores al 60 % mientras su gradiente permita la acumulación de las capas de nieve; situación que es más frecuente en las cotas superiores al *timber line*.

### **3.1.3. Esquema corrector: Criterios y objetivos de la corrección**

**Corrección de cursos torrenciales**, que obviamente se realiza cuando hay algún interés que proteger, su objetivo es tratar de alcanzar la *pendiente de compensación* o de equilibrio del torrente para un caudal *generador del lecho* previamente establecido, con el fin de conseguir la estabilidad del sistema de drenaje. Con ello se pretende dar respuesta a la cuestión: ¿Qué se puede hacer con la corriente y donde se pueden depositar los sedimentos, para que ninguno de ellos ocasione ni problemas ni daños?. Los problemas principales que se presentan son:

1. *La necesidad de una rápida evacuación de la corriente con arrastres del torrente por el tramo objeto de la corrección*, para que no peligren sus zonas limítrofes ni por las inundaciones y ni por los depósitos de sedimentos.
2. *La estabilización del curso torrencial*; tanto de su lecho (consolidándolo y evitando su erosión remontante), como en ocasiones también de sus márgenes (para que no se derrumben sobre el propio cauce).
3. *La retención de los sedimentos* para que no alcancen determinados emplazamientos (por ejemplo, al vaso de un embalse o una zona de alto valor agrícola, etc.).

Los dos primeros se relacionan con la estrategia para asegurar la estabilidad de los torrentes; el tercero, aunque también lo pretende, cumple con la misión de retener los sedimentos para que no afecten a infraestructuras que se desean conservar.

El sistema corrector puede disponer de un único dique a modo de *dique de cierre transversal al cauce del torrente*, si las características del paraje y en especial las del emplazamiento lo permiten; pero lo más frecuente es que se disponga de varios *diques transversales al cauce del torrente a modo de escalera*, estableciéndose entre diques consecutivos la pendiente de compensación o de equilibrio del torrente; de modo que donde termina la pendiente de compensación del dique de aguas abajo, se plante el dique de aguas arriba. La formación de la pendiente en cuestión depende de los eventos torrenciales y de la naturaleza y granulometría de los sedimentos del lecho.

Un aspecto muy importante en el sistema corrector de un torrente es el seguimiento de su evolución tras las diferentes avenidas, lo que permite ir conociendo su dinámica, efectuar las correcciones oportunas a las actuaciones realizadas en los mismos y prever las futuras actuaciones con criterios más sólidos justificados en la experiencia adquirida.

**Sistema de protección contra los aludes**, previamente se requiere disponer de una cartografía de identificación de los aludes o al menos tener conocimiento de su existencia; a continuación se plantea el siguiente análisis: Si los aludes no afectan a ningún interés que proteger (núcleos de población, comunicaciones, casas o refugios aislados, etc.), no es necesaria ninguna actuación por el momento. Por el contrario, si afectan, las alternativas más razonables para en el escenario en cuestión son:

1. Tratar de retener el manto de nieve allí donde se pueda desencadenar el alud.
2. Defenderse del alud desviando su recorrido

3. En situaciones muy específicas, también se frena el alud al final de su recorrido (aunque este aspecto se corresponda más bien con el escenario **II-A**.)

**Corrección de las vertientes de la cuenca hidrográfica.** El bosque, sea autóctono o procedente de repoblación, desempeña un papel fundamental en el sistema corrector de este escenario caracterizado por laderas de fuertes pendientes. Se trata de aprovechar su potencial para: *a)* proteger al suelo frente a la erosión hídrica, *b)* amortiguar los efectos del geo-dinamismo torrencial que los eventos torrenciales impriman a la cuenca y *c)* para impedir el desprendimiento de aludes. En este contexto, se presentan las circunstancias siguientes:

- 1 Si existe el bosque autóctono o de repoblación en proporciones adecuadas para la cuenca en cuestión y éste se ubica en las posiciones estratégicamente convenientes (cabeceras de cuenca, zonas de mayores pendientes y en los márgenes de sus principales cursos de agua), lo conveniente es conservarlo, tomando para ello las medidas pertinentes. Desde el punto de vista hidrológico no existe impedimento para que el bosque se aproveche, mientras se garantice su persistencia y el porte (o estructura) original de la vegetación.
- 2 Cuando no existen las cubiertas arboladas (sobre todo en las áreas definidas como estratégicas), la solución pasa por implantarlas, si las condiciones edáficas lo permiten y sobre todo si en dichas áreas se presentan problemas erosivos importantes, acudiendo a los correspondientes trabajos de repoblación si resultan precisos.

En situaciones muy específicas existen otras opciones a considerar en la ordenación de las cabeceras de las cuencas de alta montaña. El *páramo* de las cumbres andinas tropicales de América Latina, constituido por un pajonal asentado sobre andosoles muy higroscópicos, realiza similares funciones hidrológicas y de protección de la cuenca ante el geo-dinamismo torrencial que los bosques de cabecera en zonas templadas y templadas frías de Europa, siempre que se encuentre en buen estado de conservación. Además representa la vegetación climática del lugar, lo que asegura su continuidad natural mientras no sea alterado.

**Sistemas de corrección de los deslizamientos del terreno**, ante los mismos cabe plantearse la misma disyuntiva que la establecida al comentar el sistema de defensa contra los aludes. Si el deslizamiento no afecta a ningún interés que proteger, no resulta necesario actuar de momento. En el caso contrario, si les afecta, la solución radica en conseguir un doble efecto: por un lado, reducir la llegada del agua a la zona del deslizamiento (bien sea superficialmente o como flujo subterráneo), así como drenar la superficie deslizante; por otro, disminuir la pendiente de la superficie deslizante hasta alcanzar una pendiente estable.

#### **3.1.4. Técnicas utilizadas en la corrección:**

##### **Corrección de los cursos torrenciales**

Para conseguir una rápida evacuación de la corriente con arrastres por el tramo objeto de la corrección (primero de los problemas definidos en el esquema corrector), la tendencia actual es la utilización de *diques rastrillos*, transversales al cauce del torrente, que retengan los arrastres, dejando pasar aguas abajo los sedimentos más finos, a fin de prolongar la vida útil de la obra. Normalmente se trata de *diques de gravedad* en hormigón en masa o armado. En la actualidad lo más habitual son *diques de hormigón armado con grandes vertederos*, que en ocasiones pueden adoptar la forma de dos muros de hormigón enfrentados, cuya abertura central se cierra únicamente con vigas transversales a modo de rastrillos empotradados en ambos

muros, que retienen únicamente los materiales más gruesos; además, la separación de las vigas se puede graduar conforme se eleva el calado de la corriente.

Para estabilizar las laderas deslizantes de los márgenes de algunos torrentes (segundo de los problemas del esquema corrector), así como para evitar la erosión remontante en sus lechos y conseguir sus pendientes de compensación, se emplean los *diques de consolidación*, transversales al cauce del torrente. Se trata de *diques de gravedad clásicos*, cerrados y con su vertedero dispuesto en la coronación de la obra y sin más aberturas que los mechinales. Normalmente se construyen en hormigón armado, aunque tradicionalmente se han construido con mampostería hidráulica u hormigón en masa. Cuando los mismos adquieren dimensiones importantes (una altura  $\geq 6$  m, lo que supone que la corriente aguas abajo del dique adquiera un número de Froude  $F \geq 4,5$ ), se les debe proteger a pié de obra con *disipadores de energía* (colchones de agua o contradiques), que fuercen al flujo evacuado por el vertedero de la obra a experimentar el efecto de un resalto hidráulico, para así perder parte de su energía cinética.

Es muy importante que las estructuras que actúan como vertederos en los diques no queden taponados por los arrastres leñosos; para evitarlo se puede disponer aguas arriba del dique de redes de acero normalmente de amplias mallas para retenerlos; o si el vaso de sedimentación es lo suficientemente amplio, se pueden situar dentro del mismo elementos que los retengan, al tiempo que puedan obligar a la corriente a circundar el vaso antes de dirigirse al vertedero.

Salvo que se presenten laderas que deslizan sobre el propio torrente y sea preciso sujetarlas con diques de consolidación; los diques rastrillo resultan muy efectivos para conducir la corriente con arrastres del torrente aguas abajo, sin que se desborde ni se retenga, hasta confluir en otro curso de mayor caudal y con suficiente capacidad de transporte, que absorba toda la descarga líquida y sólida del torrente y lo evague con su propia corriente aguas abajo.

Cuando el curso torrencial pasa por una población de montaña, se le debe encauzar en el tramo que lo atraviesa, previa redacción de un proyecto detallado para la resolución del problema en la situación realmente planteada; además se deben establecer áreas de protección o de resguardo a ambos lados del encauzamiento, en los que quede prohibido cualquier tipo de construcción habitable. En la situación específica que se describe en este párrafo, la primera y máxima prioridad es la seguridad de las personas allí asentadas y sus pertenencias; lo que no es óbice para que en ocasiones se hayan conseguido además unas naturalizaciones muy ajustadas al entorno, si bien esto último se debe plantear en un plano totalmente secundario, aunque complementario.

En cuanto a los *diques de retención*, se construyen transversales al cauce del curso torrencial, normalmente como diques de gravedad, con mampostería hidráulica u hormigón en masa, son cerrados sin más aberturas que las de los mechinales y con su vertedero dispuesto en la coronación de la obra. También se construyen con *mampostería de gaviones*, sobre todo en cursos de laderas poco consolidadas, para aprovechar que la porosidad inicial de la fábrica evite la socavación lateral del cauce, motivo por el que su uso se ha extendido con profusión en todas las latitudes; pero tales diques requieren de un buen diseño y una construcción muy bien acabada, porque en los emplazamientos en los que habitualmente se les sitúan, pueden sufrir problemas de filtraciones que acaben por arruinar la obra.

En síntesis, para cada uno de los tres problemas planteados en este escenario, existen distintas soluciones estructurales dependiendo de las circunstancias de cada curso torrencial, que se miden tanto por sus parámetros hidráulicos convencionales, como por el tipo de sedimentos

que le llegan desde su cuenca vertiente y la naturaleza y granulometría de los materiales de su propio lecho.

***La vegetación de ribera en los márgenes de los cursos torrentiales***, en ocasiones constituye una auténtica medida de corrección por sí misma; pero como norma general su acción refuerza el efecto de las obras hidráulicas transversales al cauce, que se efectúan para controlar la dinámica torrencial del curso a corregir.

***La naturalización morfológica de los trabajos y obras de corrección de torrentes***, combina elementos tanto de la línea clásica de corrección de torrentes como de las nuevas técnicas de ingeniería paisajística. Su utilización está extendida por las regiones del norte de Italia (Veneto, Trentino, Alto Adige), oeste de Austria (Tirol) y sur de Alemania (Baviera). Su objetivo es recomponer la estructura original de los torrentes de montaña, sin alterar la seguridad que le aportan las estructuras tradicionales de ingeniería hidráulica, pero añadiendo una mejor reconstrucción morfológica de los cursos de agua y una mayor integración de los mismos al paisaje alpino.

### ***Sistemas de defensa contra los aludes***

Para retener el manto de nieve y evitar que se desprenda el alud, se emplean sistemas formados por hileras de *rastrillos*, *parrillas* o *redes anti-aludes*. En los últimos años se ha extendido el uso de las redes, por su menor peso y mayor flexibilidad y adaptabilidad a las pequeñas perturbaciones que pueda sufrir el sistema, ante ligeros movimientos del manto de nieve.

Para defenderse de los aludes desviando sus recorridos se utilizan *cuñas* y *espigones*, que aunque no impiden su desprendimiento, pueden evitar sus daños. Otro sistema utilizado consiste en las *cortinas anti-viento*, cuya misión es impedir la acumulación de la nieve en los lugares de riesgo de aludes.

En ocasiones muy específicas, para detener el alud al final de su recorrido se emplean grandes *muros de tierra*, que a veces se complementan con rastrillos instalados en su coronación.

Lo habitual ante una zona amenazada por aludes es plantear una *estrategia de corrección*, utilizando una combinación de los diferentes elementos contra los aludes; tras un análisis que incluya: *a*) las características físicas del lugar y el peligro potencial de caída de aludes en el mismo; *b*) los objetivos que se pretenden defender y *c*) la información y experiencia de los aludes anteriores habidos en el mismo lugar.

Un elemento esencial para reducir el riesgo de aludes es el bosque de montaña maduro y denso, pues su presencia regula la metamorfosis del manto de nieve. Cuando este bosque procede de repoblaciones forestales, su persistencia se puede reforzar con una oportuna ordenación por el método de *entresaca*, que supone quitar los árboles muertos o debilitados y un número limitado de pies sanos, para dejar espacios que aseguren su regeneración.

El matorral de altura defiende al suelo de la erosión hídrica, pero no es el mejor estrato para sujetar el manto de nieve, porque la nieve establecida entre su entramado no resulta estable. La experiencia en los Alpes europeos ha demostrado que, a falta de bosque, la mejor estructura vegetal para impedir el desencadenamiento de aludes es un pastizal de montaña aprovechado (a diente o a siega), en el que las hierbas no se curven ante la primera nevada.

## **Corrección de las laderas en la cuenca hidrográfica**

Las cubiertas arboladas desempeñan un papel fundamental en el sistema corrector de este escenario (salvo en las superficies con cotas superiores al *timber line*). En este contexto, la *re población forestal* de las laderas que (por sus características y por la erosión que se observa en ellas) debieran estar arboladas, implica las operaciones siguientes:

1. *Elección de especie*, se trata de un aspecto esencialmente silvícola y su objetivo es que la especie elegida se atempere al medio en el que se introduce, es decir, a sus condiciones climáticas; que dependen fundamentalmente de los factores climáticos y edáficos de la estación.
2. *Preparación del suelo*, tiene un carácter edáfico-hidrológico y su objetivo es satisfacer las condiciones hídricas de las plantas en los dos años siguientes a su plantación. Dependiendo de la pendiente del terreno se opta por los ahoyados puntuales ( $p > 40\%$ ) o se recurre a preparaciones lineales. Es habitual que estos trabajos estén mecanizados.
3. *Plantación*, es el aspecto aparentemente más mecánico, pero no por ello menos importante; porque debe atender también al reconocimiento de la planta (su procedencia, edad y estado biológico, estructural y sanitario); así como a la correcta operación de instalación de la planta en el terreno y su seguimiento en los dos años siguientes a la plantación con operaciones de binas y escardas, para asegurar el futuro de la repoblación. La plantación es normalmente manual en las pendientes más elevadas y sólo por debajo del 30 % de pendiente puede resultar rentable mecanizarla.

La repoblación forestal es necesaria para conseguir el arbolado en laderas desnudas, con síntomas de erosión acelerada y necesitadas de protección, en áreas poco húmedas situadas de latitudes con clima entre templado-frío y templado-cálido, como en ciertas regiones europeas.

Sin embargo, en zonas tropicales húmedas (ejemplo, Costa Rica) que *siguen manteniendo su capacidad biológica* para regenerar un bosque secundario a partir de los terrenos ocupados por pastizales o dedicados al cultivo, sin otra operación que abandonar dichas prácticas para que el bosque vuelva a invadir los terrenos, esta simple acción puede representar desde el punto de vista hidrológico una actuación equivalente a los trabajos de repoblación forestal con fines hidrológicos, donde la naturaleza realiza las tres labores descritas: la elección de especie, la preparación del suelo y la plantación, todo ello plenamente atemperado con el medio.

Unos trabajos complementarios y/o auxiliares a las *re poblaciones de laderas*, directamente implicados con las obras de *corrección en los propios torrentes*, son las *faginadas* o *palizadas* y las *albarradas*. Los dos primeros se encuadran en las operaciones de control de regatos y barranqueras ubicados en las vertientes directas a los torrentes, incidiendo más o menos perpendicularmente a los mismos. Consisten en pequeños diques de madera, en ocasiones viva (pues se utilizan esquejes de plantas de los géneros *Salix* o *Alnus*, que pueden enraizar en el terreno), transversales a las barranqueras y regatos, cuya misión es sujetar las laderas, evitando la erosión superficial en las mismas y regenerando en ellas el tapiz vegetal. Mientras que las *albarradas* se realizan en áreas de alta montaña, donde interesa disminuir la pendiente del terreno, para evitar desprendimientos y conseguir estabilizar las repoblaciones en las laderas de aguas abajo, se trata de pequeños muros de piedra en seco, de altura normal  $< 2\text{ m}$ , construidos siguiendo las curvas de nivel del terreno. Las *albarradas* se han utilizado también a modo de pequeños diques transversales con rebosadero incluido, para sistematizar pequeños barrancos incipientes. Cuando el vaso situado aguas arriba de la albarrada se aterraba, se

implantaba en el mismo un cultivo arbóreo y de este modo se trataba de recuperar la ladera. Las *faginadas* o *palizadas* necesitan de cierta humedad de terreno para que los esquejes puedan enraizar; mientras que las albaradas se han realizado sobre todo en climas semiáridos. Una variación de las albaradas son los *balates* o *andes*, que por su estructura y aplicación se pueden identificar con los *bancales de talud de piedra*, utilizados en la agricultura de las áreas de montaña para poder conservar el suelo de cultivo. Se emplearon en la América precolombina y de ahí parece provenir el nombre de Cordillera de los Andes.

### ***La cuestión de la ordenación de los usos del suelo en función de la pendiente del terreno***

Las superficies identificadas con el presente escenario, presentan en general pendientes elevadas, por lo que el destino natural de la mayoría de ellas es el arbolado o en su defecto un matorral denso bien conservado, si se atiene estrictamente a las recomendaciones sugeridas en las *Clasificaciones Agrológicas de Suelos* y en las *Guías de Conservación de Suelos*, que son normas de obligada recopilación en todo documento de ordenación agro-hidrológica. Sin embargo, muchos de los terrenos se dedican a pastizales y no pocos se cultivan, en ocasiones por justificadas razones sociales. A continuación se pretende aportar una interpretación lógica de las recomendaciones recogidas en los dos tipos de documentos citados, ajustándose a las distintas realidades que se pueden presentar en el escenario que se comenta.

1. En relación con los pastizales, las recomendaciones limitan este uso del suelo a terrenos cuya pendiente no rebase el 30 %, si se pretende asegurar en ellos el control de la erosión hídrica; pero es evidente que existen pastizales en todas las partes del mundo, cualquiera que sea su nivel económico y cultural, en terrenos con pendientes superiores al 30 % y, mientras se mantengan en buen estado de conservación, da la impresión de que no hay razón para que no sigan existiendo. Al respecto se comenta lo siguiente:

Si bien es cierto que los análisis teóricos y las experiencias *ad hoc* señalan al 30 % de pendiente como el valor máximo para garantizar la total estabilidad de un pastizal; también es cierto que los pastizales permanentes continúan aportando protección al suelo ante la erosión hídrica en terrenos que rebasan dicha pendiente. Su eficacia se reduce conforme se incrementa el gradiente del terreno, sobre todo para las situaciones generadas por las precipitaciones torrenciales extraordinarias, pero no se anula, mientras la degradación del suelo en la ladera no alcance niveles que resulten irreversibles. Por tanto, tratándose de pastizales, junto a la pendiente del terreno hay que especificar también el estado de conservación del suelo en la ladera en cuestión, lo que normalmente viene asociado a sus condiciones edáficas y a su profundidad.

Sin embargo, cuando la pendiente del terreno alcanza valores elevados, del orden de un 60 % o superiores, y sobre todo cuando se trata de pastizales que no presentan protección alguna en las zonas dominantes de la ladera, su eficacia disminuye sustancialmente y el riesgo de procesos importantes de erosión superficial e incluso de deslizamientos epiteliales ante la ocurrencia de eventos torrenciales extraordinarios resulta muy elevado dentro de los mismos.

2. Los terrenos genuinamente de cultivo no sobrepasan el 3 % de pendiente, a partir del cual aparecen los primeros síntomas de erosión laminar; pero en el ámbito convencional de la ordenación agro-hidrológica el área destinada a los cultivos se suele extender a terrenos de hasta un 12 % de pendiente, aplicando las *medidas de conservación de suelos*, entendiéndose por tales: el cultivo a nivel; el cultivo en fajas y el cultivo en

terrazas en su forma más sencilla (preparación del suelo constituido por un surco y su correspondiente caballón).

En terrenos con pendientes entre el 12 % y el 24 %, los cultivos se deben proteger con *prácticas de conservación de suelos*, entre las que se incluyen las terrazas continuas y el abancalado. Existen también prácticas locales de conservación de suelos, que consisten en combinaciones de las anteriores o en un reforzamiento de las mismas mediante labores de subsolado para controlar mejor el movimiento de la lámina de escurrido.

Por encima del 24 % de pendiente no se recomienda cultivar directamente el suelo, pero se puede practicar la agricultura si se realiza en bancales con taludes bien estabilizados, en ocasiones hasta con muros de piedra (existen trabajos pretéritos de este tipo en algunas zonas de los países mediterráneos, como España o Italia). También en América Latina existen cultivos bien abancalados en pendientes superiores al 24 %, como las plantaciones bajo sombra de café arábigo (ejemplo, en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica), que no presentan riesgos previsibles de erosión hídrica.

Resumiendo, el escenario que se comenta no es propicio para grandes áreas de cultivo; sino que el cultivo se debe acomodar dentro del mismo a aquellos lugares en los que resulta viable; como pueden ser las pequeñas superficies de pendiente reducida dentro de unos parajes de elevados gradientes del terreno; o en zonas en las que, aunque las pendientes sean elevadas, se han realizado en ellas trabajos de sistematización y estabilización del terreno, que permiten la práctica de la agricultura en las mismas sin riesgo aparente de erosión acelerada del suelo. Pero en ambos casos, la práctica de la agricultura tiene unos costes adicionales, que el agricultor debe afrontar para mantener el aprovechamiento sustentable en su explotación. Con tales medidas el riesgo de que aparezcan procesos erosivos importantes en las superficies cultivadas no desaparece definitivamente, pero se limita de manera razonable y con ello se mantiene en equilibrio una producción agrícola marginal que socialmente puede ser necesaria. Evidentemente, si ante un evento torrencial extraordinario aparecieran graves procesos erosivos en dichas superficies, lo conveniente es atajar el problema sin dilación, pues las consecuencias posteriores pueden resultar imprevisibles.

Las recomendaciones aportadas por las *Guías de Conservación de Suelos*, son el resultado de numerosas experiencias realizadas en cultivos y pastizales, muchas veces corroborados con modelos matemáticos elaborados *ad hoc* con la misma finalidad. Sin embargo, se trata de resultados obtenidos para unas condiciones de ensayo, en modelos simplificados, por lo que en su aplicación a las superficies de la cuenca hidrográfica debe ajustarse a la nueva realidad, donde la Naturaleza presenta numerosas variables de difícil cuantificación. Por ello una ajustada aplicación de las *Clases Agrológicas* en este escenario, puede resultar muy eficiente para poner en cultivo exclusivamente las zonas del mismo que presentan aptitudes para ello.

### ***Sistema corrector de los deslizamientos del terreno***

Lo normal en este escenario es que se trate de deslizamientos locales, en ocasiones importantes, siendo los trabajos de corrección muy complejos; por lo que la mejor solución es apartarse de ellos. Sin embargo, existe una técnica utilizada en los Alpes italianos (Veneto, Trentino, Bolzano) y austriacos (Tirol) que resulta muy efectivo si los deslizamientos no alcanzan grandes dimensiones.

Consiste en una reconstrucción de la zona deslizada, a partir en una estructura de troncos de madera colocados en filas alternas longitudinales y transversales, que recompone la ladera deslizada adoptando para ésta una pendiente previamente calculada, que le permita mantenerse en equilibrio soportando el peso de la estructura; actuación que se complementa con un drenaje interno del área corregida, para evacuar el agua que llega a la misma y, por supuesto, la propia estructura debido a sus características constructivas dispone de drenaje en su superficie. La estructura completa de corrección del deslizamiento admite ser naturalizada, implantando en su exterior especies vegetales de alta transpiración como las del género *Salix*; que, por otro lado, dado su rápido crecimiento, precisan de un riguroso control de su desarrollo, para que no sobrepasen de peso y puedan perjudicar a la estabilidad de la obra; aunque la solución es muy sencilla, basta con podar oportunamente dicha vegetación.

### 3.2. ANÁLISIS DEL ESCENARIO I-B

#### 3.2.1. *Descripción*

Áreas de montaña y de alta montaña con laderas de pendientes suaves a moderadas. Puede coincidir con terrenos paleozoicos muy moldeados, de litología silícea poco erosionable, cuyos cursos de agua no presentan un marcado carácter torrencial, salvo ante alguna crecida extraordinaria generada por lluvias torrenciales extremas o repentinias fusiones del manto de nieve. En cuanto a la posibilidad del uso del arbolado para corregir el geo-dinamismo torrencial en este escenario, cabe diferenciar (al igual que en el anterior) entre las superficies con cotas superiores o en el entorno de la línea del *timber line*, en las que existe limitación de para la expansión del bosque, y las superficies cuyas cotas son inferiores a dicha línea, en las que arbolado puede ocupar cualquier terreno, mientras disponga del perfil edáfico suficiente. El riesgo de aludes en este escenario es más reducido que en el anterior I-A.

#### 3.2.2. *Fenomenología geo-torrencial*

Las avenidas generadas por cualquier motivo en este escenario, pueden causar inundaciones en las cotas más bajas del mismo (que serán más graves en el escenario II-B, que representa su continuidad dentro de la cuenca vertiente), debido a su relieve entre suave a moderado que dificulta la evacuación del flujo; pero el transporte sólido predominante será en suspensión, salvo en los tramos iniciales de los cursos de agua que podrían comportarse como auténticos torrentes de montaña ante eventos extraordinarios. Resumiendo, los problemas que se prevén en este escenario ante los eventos torrenciales son más hidrológicos que geo-torrenciales.

#### 3.2.3. *Esquema corrector: Criterios y objetivos de la corrección*

En relación con los *cursos torrenciales*, como norma general no parece que sea necesario corregirlos. No obstante, si por alguna circunstancia especial hubiera que hacerlo, se tendrían en cuenta los criterios y objetivos descritos para el escenario anterior I-A.

Lo mismo ocurre respecto de las medidas de prevención y protección ante el *desprendimiento de aludes*, dado que tampoco se trata de un escenario de grandes riesgos. Pero en el supuesto improbable que tuvieran lugar, se atendría a lo indicado al respecto para el escenario I-A.

En lo referente a las *vertientes de la cuenca hidrográfica*, en este escenario adquiere especial significado la cuestión del tipo de cobertura vegetal que resulta más idóneo para la protección del suelo. Al tratarse de laderas de pendientes moderadas, puede no ser necesaria una cubierta

arbolada para controlar en ellas la erosión hídrica del suelo, siendo suficientes estructuras vegetales de escaso desarrollo aéreo y sistema radical bien desarrollado y penetrante, como matorrales o pastizales, siempre que se mantengan en buen estado. Con ello se reduce la transpiración y puede mejorar el aprovechamiento hídrico; que en el supuesto que el escenario en cuestión fuera el compone principal de la cuenca alimentadora a un embalse, podría contribuir a aumentar el volumen embalsado. Lo expuesto no es impedimento para que terrenos, identificados como del presente escenario, se aprovechen como bosques, incluso siendo vertientes directas a embalses de abastecimiento de agua; porque los bosques por lo general soportan menos ganado, lo que reduce los problemas de eutrofización en los embalses. Además, tratándose de bosques climáticos y maduros, su evapotranspiración tampoco es tan elevada, aunque siempre superior a la que presenta un pastizal o un matorral.

En América Latina este escenario se puede identificar con algunas superficies de *páramos*, vegetación natural de la alta montaña tropical, que no tiene un gran desarrollo aéreo, pero sí un entramado radical con potencia suficiente para mantener los andosoles sin alterarse y, como se ha indicado, representan la cubierta idónea en la ordenación de cuencas tropicales de alta montaña, siempre que se mantengan en su estado natural y bien conservados.

Una cuestión a tratar en relación con este escenario, son los *problemas hidráulicos por anegamiento* que pudieran surgir en sus cotas más bajas en el caso de eventos torrenciales, tanto normales pero sobre todo los extraordinarios, debido a que su drenaje resulte lento por estar condicionado al escaso gradiente de las laderas que configuran su relieve. Cuando el entorno que pudiera inundarse esté habitado, hay que estudiar los límites de la previsible inundación y planificar las medidas de protección para la población.

### **3.2.4 Técnicas utilizadas en la corrección**

Salvo para el hipotético caso de inundaciones en las cotas más bajas del presente escenario, que pudieran afectar a zonas habitadas o a infraestructuras, en cuyo caso la solución consiste en protegerlas mediante *muros* tratándose de viviendas o plantear *trazados alternativos* (temporales o fijos) en el caso de las infraestructuras; no se referirá directamente a las técnicas de corrección, cuya necesidad inmediata no se advierte, sino únicamente al aprovechamiento racional y deseable de los terrenos del escenario en cuestión dentro de su ordenación agrohidrológica, en su doble aspecto agronómico y lúdico; como medida preventiva ante una transformación no deseable del mismo.

En el aspecto agronómico sus terrenos se pueden utilizar indistintamente como áreas de bosque (hasta donde lo permita el *timber line*), como pastizales, como una combinación de los mismos, e incluso para cultivos en las zonas que presenten mejores condiciones climáticas; cualquier opción resulta técnicamente justificable.

Para determinados parajes de América Latina representados en este escenario, como el *páramo*, se debe contemplar la opción de declararlos como espacios protegidos, con alguna de las múltiples figuras legales que existen para catalogarlos y de este modo conservarlos en su estado natural, para que sigan desempeñando sus funciones hidrológicas en la cuenca.

En cuanto al aspecto lúdico, conviene considerar que el hecho de que este escenario no presente riesgos de desprendimiento de aludes, no implica que no disponga del suficiente manto de nieve en invierno, como para que pueda ser aprovechado para practicar los deportes de invierno. Planificar una buena ordenación del territorio desde el principio, puede resultar

decisivo para preservar en el futuro los valores de todo tipo (biológicos, paisajísticos, etc.) de la zona, evitando errores que pudieran derivarse de cualquier tipo de intervenciones agresivas o al menos no deseadas en el medio, que a posteriori resultan difíciles de subsanar y que terminan afectando a la conservación del suelo y del agua en el paraje en cuestión. Conservar estos elementos es un objetivo irrenunciable en una ordenación hidrológico-forestal.

Las áreas de este escenario con mejores condiciones climáticas, al tratarse de terrenos con un relieve moderado, están capacitadas para cualquier tipo de aprovechamiento, siempre que tengan perfil edáfico suficiente. Pero la ampliación de los cultivos en el área dominante (que es el caso del escenario que se analiza) da lugar a cuencas básicamente agrícolas, pues el destino preferente de las áreas dominadas son los cultivos (por tratarse en general de las zonas de suelos más profundos y con mejor microclima). La mayoría de los cultivos necesitan del riego (o al menos de agua) para ser rentables, por lo que las necesidades hídricas de una cuenca, en su mayor parte cultivada, podrían llegar a igualar o incluso superar a las demandas la misma cuenca con una parte de su área dominante con arbolado, o al menos con una vegetación permanente arbustiva no degradada, sin las ventajas de protección del suelo que ofrece el arbolado situado en dichas zonas estratégicas ante precipitaciones torrenciales; lo que cobra mayor interés en los terrenos con mayores pendientes, o en aquellos otros que por su orientación pudieran contribuir a la captación del agua de las precipitaciones horizontales o nieblas; por lo que a largo plazo puede resultar más efectivo para asegurar la propia agricultura que se practica en la cuenca.

En las cabeceras de la cuencas los fenómenos erosivos son más graves y además sus efectos se transmiten *a posteriori* a toda la cuenca; por lo que una cuenca con las cabeceras arboladas y las áreas dominadas con cultivos representa un sistema más estable en el tiempo, pues los fenómenos geo-torrenciales se controlan en su origen con una inversión moderada, sobre todo para las precipitaciones torrenciales ordinarias; además de contribuir al mantenimiento de la biodiversidad. Para ilustrarlo con un ejemplo, se plantea la siguiente pregunta: ¿Hasta donde resulta eficiente extender el cultivo pendiente arriba en una ladera?. ¿Hasta donde es rentable a corto plazo o hasta donde lo permite un desarrollo sostenible?. Evidentemente hay cultivos que por su alta rentabilidad permiten inversiones elevadas en técnicas de conservación de suelos, realizando importantes nivelaciones del terreno; pero incluso en estos casos, el tramo final de la ladera se destina al arbolado o al menos a una vegetación permanente, porque su ausencia supone el riesgo que se llenen de agua y sedimentos los bancales situados en las cotas más altas en cualquier precipitación torrencial, aunque sea normal.

### **3.3. ANÁLISIS DEL ESCENARIO II-A**

#### ***3.3.1. Descripción***

Se trata de las zonas dominadas de las cuencas vertientes de relieve montañoso definidas en el escenario anterior **I-A**. Aunque las pendientes en las áreas de este escenario resulten inferiores, tanto en las laderas vertientes como en los propios cursos de agua, aún siguen siendo elevadas y con frecuencia alcanzan en estos últimos valores del orden del 10 % o incluso superiores. El bosque no tiene impedimentos para cubrir el escenario en cuestión, mientras cuente con el perfil edáfico necesario.

Dentro de este escenario se pueden diferenciar dos situaciones. La primera se refiere a las áreas dominadas de las cuencas de alta montaña, en las que el torrente descarga sus caudales líquidos y sólidos a otro curso de mayor caudal, cuya corriente se encarga de recibirlos y

transportarlos aguas abajo; produciéndose dicha confluencia en una zona que continúa siendo de montaña (de cotas elevadas) en las que se pueden presentar problemas geo-torrencales específicos causados por el transporte sólido del torrente. La segunda se trata de áreas dominadas que se sitúan en altitudes bajas e incluso tratarse de las vertientes de los tramos finales de cursos torrencales que desembocan directamente en el mar, circunstancia que presenta repercusiones importantes si en sus proximidades se sitúan poblaciones.

### **3.3.2. Fenomenología geo-torrencial**

La dinámica geo-torrencial de este escenario es una prolongación de la que se presenta en el escenario **I-A**; por tanto puede llegar a ser muy intensa en el caso de eventos torrencales extraordinarios; siendo su máxima manifestación la formación en el curso torrencial de un gran cono de sedimentación en la confluencia con el curso principal al que es tributario.

Este escenario, especialmente cuando se ubica en cotas elevadas, también puede ser receptor de aludes que se desprenden del escenario superior **I-A**, sobre todo de los conocidos como *aludes de fondo o de corredor*, que utilizan para su descenso los mismos canales por los que transitan los torrentes.

También puede ocurrir en este escenario y es bastante normal que así suceda, que el torrente mantenga una situación de equilibrio permanente, porque la corriente del curso principal al que es tributario presenta en todo momento un caudal con capacidad de transporte suficiente, como para evacuar aguas abajo todo el caudal líquido y sólido que le incorpora el torrente, evitando de este modo la formación del cono de sedimentación.

Pero en cualquier caso, cuando en la cuenca sobrevienen precipitaciones torrencales extremas, se generan avenidas extraordinarias tanto en el curso torrencial como en el principal, dando lugar a caudales punta elevados con un gran aporte de sedimentos tanto en suspensión como en acarreos; causando el desbordamiento de los cauces ordinarios e inundando sus áreas limítrofes, que posteriormente, tras el paso de la avenida, quedarán cubiertos de sedimentos.

### **3.3.3. Esquema corrector: Criterios y objetivos de la corrección**

En relación con el comportamiento de los *cursos torrencales*, el problema principal que puede surgir en este escenario, es que la descarga sólida del curso torrencial dificulte la llegada de su corriente al curso principal al que por morfología debe confluir, imposibilitando la evacuación del caudal sólido y generando un cono de sedimentación. Se trata, por tanto, de analizar la manera en que tiene lugar la formación de dicho cono y de estudiar el modo para que el flujo del torrente lo atraviese y desemboque en el curso principal al que es tributario.

Puede ser interesante de considerar el caso de un torrente que desemboque directamente en un lago de montaña, ante la posibilidad de que por un evento torrencial extraordinario el torrente descargara un caudal sólido importante sobre el lago, que afectase seriamente a la estabilidad momentánea del mismo y transmitiera una onda de avenida por su sumidero a todo el sistema de drenaje aguas abajo. La cuestión podría generar situaciones difíciles de prever, pero que podrían ser muy graves. También se puede considerar la variante en la que lo que incide sobre el lago sea un alud de grandes dimensiones.

Respecto de la *protección contra los aludes*, se trata de defenderse de sus efectos; pues cuando inciden en este escenario es porque ya se han desprendido. Para ello se pueden utilizar *medidas de desviación* del recorrido del alud, o *dispositivos para su frenado* en las zonas donde el alud haya perdido una parte de su energía cinética; el efecto esperado con los dispositivos de frenado (que deben tener cierta elasticidad, para que en ningún caso entren en carga) es conseguir que el alud pierda el resto de su energía y detenerlo. Las actuaciones adoptadas deben prever en todos los casos la ubicación de la masa de nieve desviada o frenada, así como controlados los previsibles movimientos de la misma hasta llegar al lugar de su depósito.

Cuando el curso torrencial desemboca directamente en el mar, un único evento torrencial extraordinario puede resultar suficiente para que se forme en la costa un gran cono de sedimentación. Ante tal situación se debe plantear el siguiente análisis:

1. Si curso torrencial desemboca en un paraje deshabitado y sin vías de comunicación, la formación del cono de sedimentación pasará inadvertida y no es necesario de momento realizar de ninguna medida de corrección, pero sí tenerlo en cuenta para el futuro.
2. Pero si el curso torrencial desemboca en el mar cerca de núcleos habitados, incluso en ocasiones de grandes poblaciones turísticas (algo que se presenta en todas las latitudes, tanto en países en vías de desarrollo como en los muy desarrollados), la situación reclama una planificación de la *corrección completa del sistema de drenaje de la cuenca y de la restauración hidrológico-forestal de esta última*; utilizando para tal fin todas las técnicas de corrección de torrentes y de restauración hidrológico-forestal de sus cuencas alimentadoras. Además, *es de una importancia capital dejar el canal o espacio suficiente al curso torrencial, para que en los momentos de sus máximas avenidas extraordinarias desemboque directamente al mar sin que se le presenten obstáculos*.

En las situaciones en las que el curso torrencial confluye en el curso principal al que es tributario *sin que se forme el cono de sedimentación*, la afluencia puede suceder de forma totalmente natural, pero en ocasiones resultan necesarias ciertas rectificaciones en el tramo final del curso torrencial para conseguirlo. Éstas requieren como punto de partida un esquema *directriz en planta del tramo a corregir* consecuente con el régimen hidrodinámico de su corriente; para abordar a continuación las actuaciones rectificadoras mediante *obras longitudinales al cauce*, para conseguir la protección de sus márgenes y riberas.

En los últimos tiempos se han actualizado las *actuaciones de naturalización paisajística de las obras longitudinales*, utilizando con frecuencia materiales vivos, como estaquillas de las especies de los géneros *Salix* y *Alnus*, para delimitar los márgenes de los cursos de agua; de manera que pasados dos o tres años éstas reverdecen y conforman una galería de vegetación en el curso en cuestión. De este modo se han integrado nuevamente al ámbito de la corrección de cauces, incluidos los cauces torrenciales, las técnicas que en el pasado fueron muy utilizadas para la ejecución de *faginadas y palizadas*, con el fin de tapizar los taludes que incidían directamente en los torrentes objeto de corrección; sin que se descarte que se sigan utilizando para esta finalidad.

El *uso del bosque* en este escenario merece un análisis detenido. Es interesante su presencia como estabilizador del suelo en las zonas en las que no interfiera para nada en el recorrido de la corriente, pues se trata de superficies con pendientes en general elevadas; pero no en las áreas que pudiera interrumpir su paso; pues lo probable es que, en situaciones de avenidas extraordinarias, termine por obstruir la nueva sección que toma el cauce durante la avenida;

provocando casi con toda probabilidad represamientos temporales que, de prolongarse el fenómeno torrencial, podrían terminar destruyéndose y generando una onda que se transmita aguas abajo del torrente, cuyas consecuencias podrían ser catastróficas. Cuando el torrente no presenta problemas de formación del cono de sedimentación, la aplicación principal del arbolado es como integrante del *bosque en galería* a ambos márgenes del curso a corregir.

### **3.3.4. Técnicas utilizadas en la corrección**

#### **Corrección de cursos torrenciales**

En lo que se refiere a posibilitar que la corriente del torrente supere todos los obstáculos que le pueda causar su carga sólida para confluir en el curso principal al que es tributario, tras haber surtido los *diques rastrillo* los efectos oportunos en los tramos situados aguas arriba de este escenario, existen diferentes técnicas dependiendo de la complejidad que se presente en cada situación. La solución más efectiva, pero también la más costosa, es la construcción de un *canal escalonado de tramos erosionables*, que atraviese todo el cono de deyección desde su inicio hasta la desembocadura del torrente en el curso al que es tributario. Dicha estructura dispone de un *dique de cierre* al inicio del canal, para regular el flujo que entra en el mismo; a continuación consiste en un conjunto de *tramos canalizados*, en forma de escalera muy tendida, de modo que en cada escalón la corriente experimente la formación de un resalte hidráulico; el calado conjugado resultante del mismo, se estabiliza en el tramo canalizado de aguas abajo, antes de que la corriente experimente un nuevo resalte en el escalón del final de dicho tramo. La corriente continúa operando de igual modo en los tramos siguientes, hasta que el torrente termine todo el recorrido del canal.

Esta solución del *canal escalonado de tramos erosionables* resulta válida tanto para las zonas de montaña como para cuando el curso torrencial desemboca en el mar y su cono de sedimentación se forma en la costa. Como ejemplo representativo en América Latina de esta segunda situación se citan las obras de corrección de torrentes llevadas a cabo en el estado de Vargas (Venezuela), tras las avenidas torrenciales extraordinarias que tuvieron lugar en dicho país en diciembre de 1999. Dichos torrentes se dirigen directamente al mar desde una altitud de 2000 m, e inciden sobre una zona turística de la costa atlántica venezolana.

Cuando los cursos torrenciales vierten directamente al mar en una costa en la que se asientan núcleos población, junto al *canal escalonado de tramos erosionables* o un *canal convencional de evacuación* que descargue las máximas avenidas extraordinarias del curso torrencial al mar; se deben proyectar áreas laterales de resguardo y protección, estableciendo de este modo el espacio suficiente en el tramo final del curso torrencial, que constituye la obra principal del sistema de corrección. Pero además se debe planificar y ejecutar la *corrección completa del sistema de drenaje de la cuenca y la restauración hidrológico-forestal de esta última*, lo que implica corregir los tramos del curso torrencial situados aguas arriba del canal de evacuación, mediante *diques rastrillo* transversales al curso torrencial (en la situación más general) o con *diques de consolidación* también transversales al curso torrencial (cuando sea necesario sujetar los taludes que conforman el cauce del torrente); así como las *medidas de creación y mantenimiento del bosque* en las vertientes de la cuenca, que por sus pendientes y posición altimétrica deban protegerse con arbolado. También se deben tomar las medidas de prevención necesarias, para que ante avenidas extraordinarias no se produzcan taponamientos en los cauces, por retención de residuos de grandes dimensiones procedentes del propio bosque (como troncos, ramas, etc.) que agraven los efectos catastróficos de la avenida.

### ***Sistemas de defensa contra los aludes***

En lo relativo a la *protección contra los aludes* dentro este escenario, para desviar sus recorridos se utilizan *cuñas* y para frenarlos *muros de tierra*, aunque en los supuestos en los que la probabilidad de riesgo del alud resulte menor o los daños potenciales previsibles sean reducidos, también se han usado *montones de tierra* situados estratégicamente en la zona de parada del alud. Las *cuñas* son muy utilizadas para proteger casas o edificios aislados, como refugios, pequeñas iglesias de montaña, etc.

### ***La utilización del arbolado en las áreas dominadas***

En relación con el *uso del arbolado*, se remite a lo referido en los *criterios y objetivos* establecidos en su esquema corrector, tanto para las superficies directamente afectadas por el drenaje y sus zonas adyacentes, como para las superficies no afectadas por el mismo pero pertenecientes también a este escenario.

No obstante, no se debe olvidar el efecto de protección que ejerce el bosque, situado aguas arriba del área donde se forma o puede formarse el cono de sedimentación, sobre esta última. En el caso que se ha comentado de un torrente que desemboca directamente en un lago de montaña, si las vertientes al lago están cubiertas de arbolado, el riesgo de caída de aludes disminuye, porque el bosque incide en los procesos de la metamorfosis de la nieve, estabilizando con ello su manto. Asimismo, el bosque también puede contribuir a reducir la erosión superficial en las laderas vertientes al lago, contribuyendo con ello a mantener la calidad de las aguas y a prolongar su vida. Además, se menciona la necesidad de preservar estos lagos de cualquier agente contaminante; para lo que una de las medidas más serias es mantener el torrente bajo estrictas medidas de control.

Con frecuencia una parte importante de la superficie de este escenario suele estar dedicado a pastizales, aprovechamiento que técnicamente no debe presentar problemas, mientras las pendientes del terreno no sean muy elevadas, pero que es preciso controlarlo.

### ***Obras longitudinales de defensa de márgenes y riberas en cursos de agua***

Cuando las características geo-torrenciales del curso de agua son moderadas y las actuaciones a realizar en el mismo no inciden directamente sobre la dinámica geo-torrencial, sino que tratan de presentar un obstáculo continuo a la expansión lateral de las aguas en crecida en las márgenes vulnerables del curso en cuestión; se recurre a las *obras longitudinales al cauce*. Estas obras, que se proyectan previa adopción de un esquema directriz en planta del tramo a corregir, consecuente con el régimen hidrodinámico de la corriente, pueden consistir exclusivamente en *ingeniería hidráulica* (*malecones o escolleras, espigones*), *biológicas* o *bioingenierías* (*bosque en galería a ambos márgenes del cauce*) o *mixtas* (formadas por la combinación de ambos). En cualquier caso, hay que tener en cuenta que las obras longitudinales tienden a elevar el calado de la corriente, con lo que incrementan la tensión de arrastre de ésta; por ello, tratándose fundamentalmente de obras de ingeniería hidráulica o mixtas, es conveniente complementar las obras longitudinales con umbrales de fondo, transversales al cauce, para sujetar el lecho del curso en cuestión en el tramo encauzado. Es bastante común tratándose de este tipo de trabajos, que una vez que se han alcanzado los objetivos iniciales de defensa del cauce, sean objeto de labores de naturalización.

En cualquier caso, la idea central que debe prevalecer en este escenario, es que la corriente adquiera la pendiente hidráulica adecuada, que le permita una rápida evacuación del área de sedimentación.

En algunos países, como en Costa Rica, la defensa de los márgenes de los cursos de agua mediante vegetación arbolada de riberas se recoge en su legislación medioambiental.

### **3.4. ANÁLISIS DEL ESCENARIO II-B**

#### ***3.4.1. Descripción***

Se trata de las áreas dominadas de cuencas vertientes con laderas de pendientes entre suaves y moderadas. Dentro del escenario cabe diferenciar entre las superficies con determinada altitud, que se corresponden con cuencas de montaña, y las áreas de escasa altitud, que normalmente responden a cuencas de mayor extensión, aunque también puede tratarse de pequeñas cuencas. Debido a sus relieves moderados las superficies de este escenario son apropiadas para cultivos y pastizales, aunque no existan problemas para la presencia del arbolado, que en la práctica puede reducirse a algunos bosquetes aislados o a plantaciones lineales de riberas.

#### ***3.4.2. Fenomenología geo-torrencial***

El carácter torrencial de este escenario lo definen casi exclusivamente las precipitaciones torrenciales extraordinarias, que pueden provocar importantes avenidas en los cursos que drenan por el mismo, llegando a inundar amplias superficies debido al perfil entre suave y moderado de su relieve, así como causar importantes efectos erosivos en los cultivos, especialmente cuando se asientan en terrenos con cierta pendiente y no se han tomado las medidas y prácticas de conservación de suelos pertinentes; incluso, si se han tomado, las lluvias torrenciales extraordinarias pueden hacer sentir sus efectos. La descarga sólida en las avenidas es predominantemente en suspensión. Si se trata de un curso torrencial que llegue a formar un cono de sedimentación, éste será amplio y de escasa pendiente y, sobre el mismo, el curso en cuestión realizará numerosos meandros antes de abandonarlo y generar el canal de desagüe, que desembocará en un curso de mayor caudal al que es tributario.

Cuando se trata de superficies de escasa altitud que constituyen áreas dominadas de grandes cuencas fluviales, las precipitaciones torrenciales extraordinarias y generalizadas pueden causar importantes avenidas y extensas superficies inundadas; mientras que si se trata de pequeñas cuencas hidrográficas, su vulnerabilidad podría ser la menos grave de todas las situaciones analizadas en este apartado 3, aunque lógicamente se produzcan inundaciones. Pero esta última situación puede variar sustancialmente, si se trata de cursos torrenciales y la morfología inicial del territorio más o menos estable se modifica seriamente con intervenciones desafortunadas, como puede ser una alteración de su red de drenaje natural para acondicionar el territorio a nuevos usos agrícolas de mayor productividad (se recuerda que el escenario en cuestión es eminentemente agrícola); en tal caso y ante precipitaciones torrenciales extraordinarias se pueden generar verdaderos procesos geo-torrenciales en las áreas afectadas por dichas alteraciones. Lo comentado resulta un problema bastante habitual en las nuevas plantaciones de regiones que anteriormente se conservaban en su estado natural y que han sido puestas en producción de forma acelerada y sin las convenientes prevenciones medioambientales.

### **3.4.3. Esquema corrector: Criterios y objetivos de la corrección**

Aunque no se trate de una medida corrección de un problema geo-torrenciales, se pueden considerar como actuaciones correctoras de este escenario las medidas de *mantenimiento y/o creación de formaciones arboladas en los márgenes de los cursos de agua* que drenan por el mismo, con el fin de proteger sus riberas y disminuir la emisión lateral de sedimentos a los citados cursos; formaciones que se conocen también por *bosques en galería*.

En el resto de las superficies del presente escenario, dadas sus características de pendientes suaves a moderadas, su vocación natural son los cultivos y pastizales; aunque en cualquier caso el bosque representa otra alternativa válida y posible. En todo lo relativo a los usos del suelo, se recomienda atenerse a lo dispuesto en las *Clasificaciones Agrológicas de Suelos* y en las *Guías de Conservación de Suelos*, referidas anteriormente, y a la interpretación que se ha realizado de las mismas.

#### **Técnicas utilizadas en la corrección**

Para las avenidas causadas por precipitaciones torrenciales ordinarias, se puede conseguir una adecuada *protección de los márgenes de los cauces* que drenan por este escenario, con el *mantenimiento y/o la creación de formaciones arboladas de ribera*. Si con las mismas no fuera suficiente, se llevarían a cabo las pertinentes correcciones del cauce, centradas en obras de rectificación mediante *espigones* o *escolleras*, que en los cursos de marcado carácter torrenciales se completan con *umbrales de fondo*, para frenar la erosión del lecho causada por el incremento de la tensión tractiva de la corriente, debida a la elevación del calado que motivan las propias obras longitudinales. También se utilizan *bioingenierías* (formación de márgenes con estaquillas vivas de las especies de los géneros *Salix* y *Alnus*) para asegurar la protección de las orillas del cauce.

Cuando las avenidas corresponden a eventos torrenciales extraordinarios, las inundaciones resultan inevitables y el efecto del bosque en galería se reduce a señalar los márgenes del río en las avenidas ordinarias; pero ese mismo efecto, apreciablemente insuficiente, resulta conveniente, porque permite delimitar, por ejemplo, las áreas de salvamento. Por otro lado, conforme bajan las aguas y se restablece el caudal ordinario del río, el bosque en galería retiene todo tipo de arrastres laterales (sedimentos, restos orgánicos e inorgánicos, etc.) que de otro modo irían a parar a la corriente y podrían obturar el paso del flujo en algunas estructuras situadas aguas abajo de su recorrido, como en puentes, azudes etc.

Cada día se considera más necesario adoptar medidas de prevención ante las avenidas extraordinarias, para que no causen taponamientos en los cauces por retención de residuos vegetales de grandes dimensiones (como troncos, ramas, etc.) procedentes del arbolado que se encuentra próximo al cauce, que puede contribuir a agravar los efectos catastróficos de la avenida. A este 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).

En cuanto a la corrección de los problemas geo-torrenciales que pueden surgir, en el caso que ocurran precipitaciones torrenciales extraordinarias en la cuenca, en los tramos de drenaje natural de este escenario que han sido alterados y de las áreas afectadas por ellos; son de aplicación las *técnicas de reconstrucción de los cauces naturales* comentadas para los escenarios anteriores, pero adaptándolas a las características del presente, lo que obliga a un buen conocimiento de la topografía y condiciones morfológicas del lugar.

#### 4. CONCLUSIONES FINALES

La Tabla 2 resume los principales problemas que se presentan en cada uno de los escenarios establecidos para las cuencas vertientes en la matriz de la Tabla 1, ante la aparición en ellas de eventos torrenciales extraordinarios (precipitaciones torrenciales, fusiones repentinas del manto de nieve y aludes). La Tabla 3 muestra la ubicación de las técnicas y medidas de restauración hidrológico-forestal para el esquema restaurador de una cuenca torrencial.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiló Bonnín J.** (1976) *Evaluación de inversiones en la ordenación agro-hidrológica de cuencas*, pp. 72, ICONA, Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Catalina Mimendi M. A.; Vicente Fernández C.** (2002) *Hidrología Forestal de la provincia de Málaga*, Monografía núm. 18, pp. 365, Servicio de Publicaciones de la Diputación de Málaga, España.
- García Nájera J. M.** (1943, 1962) *Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes*, pp. 297, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, IFIE, Madrid.
- Lenzi M. A.; Comiti F.; Mao L.; Andreoli A.; Pecorari E.; Rigon E. y 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)*, pp. 175, Deliverable D22, Equipo del Proyecto EPIC FORCE de la Universidad de Padova (Italia).
- Mintegui Aguirre J. A.; López Unzu F.** (1990) *La Ordenación agro-hidrológica en la planificación*, pp. 306, Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria.
- Mintegui Aguirre J. A.; De Simón Navarrete E.; García Rodríguez J. L.; Robredo Sánchez J. C.** (1993) *La restauración hidrológico-forestal de las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*, pp. 325, Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca, Sevilla.
- Mintegui Aguirre J. A.; Robredo Sánchez J.C.** (en prensa) *Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques en cuencas de montaña*, pp. 182, PHI UNESCO, Montevideo (Uruguay).
- Varios Autores; De Palacio (coordinador)** (1999) *La restauración hidrológico-forestal en España: Gestión sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación*, pp. 75, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente
- Varios Autores; López Cadenas de Llano F. (coordinador)** (1994, 1998) *Restauración Hidrológico-Forestal de cuencas y Control de la erosión*, pp. 929, Ministerio de Medio Ambiente, Tragsa y Tragsatec, Ediciones Mundi Prensa, Madrid.

Altitud Pendiente		I. Áreas dominantes o de cabecera de la cuenca	II Áreas dominadas o valles de la cuenca.
<b>A</b>	<b>Laderas con pendientes elevadas o escarpadas.</b>  <b>Pendiente media de la cuenca &gt; 20 %</b>	<p>1) Áreas de montaña y de alta montaña cuyos relieves con fuertes pendientes acentúan en los torrentes su carácter geo-torrencia ante eventos torrenciales extraordinarios.</p> <p>2) El geo-dinamismo torrencia puede ser muy intenso.</p> <p>3) Elevada probabilidad de riesgo de aludes durante el invierno.</p> <p>4) El uso del bosque como elemento restaurador se limita a cotas inferiores al <i>timber line</i>.</p> <p>5) En cotas inferiores al <i>timber line</i> la capacidad del bosque como elemento restaurador del escenario es muy importante.</p>	<p>1) Se trata de las típicas áreas en las que la descarga sólida del torrente puede generar un cono de sedimentación, dificultando a su corriente incorporarse al curso principal al que por morfología es tributario. Si el torrente desemboca en el mar, el cono de deyección se forma en la costa.</p> <p>2) Los problemas geo-torrenciales pueden ser muy serios por la divagación de la corriente del torrente sobre su cono de sedimentación.</p> <p>3) También puede ocurrir que la descarga del torrente en el curso principal al que es tributario o en el mar se realice sin la formación del cono de sedimentación; porque la corriente del curso principal, o el oleaje y las mareas, sean capaces de arrastrar el caudal sólido del torrente aguas abajo o fuera del entorno de la costa, según de los casos.</p> <p>4) No es probable en este escenario el desprendimiento de aludes, pero sí la recepción de los mismos.</p>
<b>B</b>	<b>Laderas con pendientes de suaves a moderadas.</b>  <b>Pendiente media de la cuenca &lt; 20 %</b>	<p>1) Áreas de montaña y de alta montaña cuyos relieves no acentúan en los torrentes su carácter geo-torrencia ante eventos torrenciales.</p> <p>2) Geo-dinamismo torrencia es menos intenso que en la situación I-A.</p> <p>3) El riesgo de aludes se reduce respecto al escenario I-A.</p> <p>4) Debido al relieve moderado de este escenario, en ocasiones se puede alternar el uso del bosque como elemento restaurador con el empleo de otras cubiertas vegetales (matorrales o pastizales), que pueden ofrecer una protección adecuada al suelo ante la erosión hídrica.</p>	<p>1) Áreas dominadas de cuencas que por su morfología no favorecen el desarrollo del fenómeno del geo-dinamismo torrencia ante la ocurrencia de eventos torrenciales extraordinarios, aunque se den inundaciones (favorecidas por el escaso relieve del escenario) y problemas de erosión del suelo sobre todo en las zonas más vulnerables.</p> <p>2) En general son áreas apropiadas para cultivos y pastizales y su principal cuestión es adoptar las medidas y prácticas adecuadas para la conservación del suelo en las mismas.</p> <p>3) Cuando en estas áreas, potencialmente productivas, se alteran sus drenajes naturales para acondicionar los terrenos a cultivos intensivos; es conveniente considerar previamente las condiciones hidráulicas, hidrológicas y medioambientales del lugar, para no generar situaciones que ante eventos torrenciales extraordinarios, puedan desencadenar fenómenos geo-torrenciales de gran intensidad.</p>

Tabla 2. Problemáticas ante la ordenación y restauración hidrológico-forestal en los diferentes escenarios de una cuenca vertiente.

Localización		Medidas correctoras			Objetivos
Posición	Espacio	Actuaciones	Especificaciones		
Área dominante de la cuenca hidrográfica	Superficies vertientes	Mantenimiento y creación de cubiertas forestales permanentes	Conservación de las masas arboladas y del matorral denso no degradado existentes		Reducir y controlar las escorrentías directas por mejora de la infiltración
			Repoplaciones forestales		Controlar la humedad del suelo
			Control y aprovechamiento de los pastizales		Controlar la erosión laminar y en regueros
			Control de laderas con obras de materiales vivos (vegetación)	Tepes Fajinadas Palizadas	Controlar los barrancos incipientes y las erosiones remontantes en las laderas
		Medidas de control de las escorrentías y Prácticas de conservación de suelos	Terrazas Bancales Albarradas Drenajes		Controlar las cárcavas, conchas de erosión y deslizamientos superficiales. Controlar las erosiones en masa incipientes: reptación y solifluxión
	Caucos de drenaje	Obras transversales	Diques de retenida total (en ocasiones actúan como diques de consolidación) Diques de retenida selectiva		Establecer la pendiente de compensación (flujo monofásico) o de equilibrio (flujo bifásico) Controlar la erosión remontante en el lecho del torrente Retener sedimentos aguas arriba del dique En los diques de consolidación, estabilizar la erosión en el lecho y los movimientos de laderas
			Umbrales de fondo		Estabilizar el lecho y controlar su erosión
		Obras longitudinales	Protección de márgenes y riberas con vegetación arbolada, acompañada o no de escolleras		Defender de los márgenes de la erosión causada por la abrasión de la corriente
		Obras mixtas	Perfil escalonado de tramos erosionables		Evacuar rápidamente la corriente torrencial en las avenidas por un canal de tramos erosionables.
		Obras longitudinales	Protección de márgenes y riberas con vegetación arbolada, acompañada o no de escolleras Protección de márgenes mediante malecones (escolleras) o espigones		Defender de los márgenes de la erosión causada por la abrasión de la corriente. Defensa de los márgenes de las inundaciones y de las erosiones por abrasión de la corriente. Rectificaciones del eje hidráulico del cauce.
Área dominada de la cuenca hidrográfica					

Tabla 3. Sistema corrector de una cuenca hidrográfica de carácter torrencial