

Lucas Mallada, **18**: 311 a 378
ISSN: 0214-8315, e-ISSN: 2445-060X
<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>
Huesca, 2016

**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA RESTAURACIÓN
HIDROLÓGICO-FORESTAL EN LA ATENUACIÓN
DE LOS RIESGOS NATURALES EN LAS CUENCAS DE MONTAÑA:
APLICACIÓN EN EL PIRINEO ARAGONÉS**

Juan Ángel MINTEGUI¹
Santiago FÁBREGAS²
José Carlos ROBREDO¹
Pablo HUELIN¹

RESUMEN.— La gran mayoría de los proyectos de restauración hidrológico-forestal de cuencas de montaña en España se efectuaron hace más de cincuenta años y algunos rebasan el siglo. Son proyectos que se planificaron y ejecutaron para asegurar la viabilidad futura de las actividades en la montaña con un horizonte temporal a largo plazo; exigieron importantes inversiones y causaron profundas transformaciones en el medio. Aunque se alcanzó su principal objetivo, habilitar la montaña, la profunda evolución que ha experimentado la sociedad en el último medio siglo le impide percibir unos logros que inconscientemente disfruta. Esta situación supone un serio riesgo para la conservación del bosque surgido de sus reforestaciones y el mantenimiento de las obras ubicadas en los torrentes para controlar sus crecidas ante aguaceros extraordinarios.

Recepción del original: 24-1-2017

¹ Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. E-28040 MADRID. juanangel.mintegui@upm.es, josecarlos.robredo@upm.es, pablo.huelin@upm.es

² Director de la Agrupación Europea de Cooperación Territorial (AECT) Espacio Portalet. E-22640 SALLENT DE GÁLLEGO. sfabregas@espalet.eu

Se expone una metodología, basada en criterios científico-técnicos, para analizar la transformación experimentada por la montaña con dichos proyectos en el tiempo y estimar el grado de protección proporcionado por los mismos ante los riesgos naturales mediante: 1) las cubiertas forestales surgidas de las reforestaciones; 2) las obras ejecutadas en sus cauces de drenaje e incluso en sus laderas, cuyo correcto comportamiento está condicionado a la evolución de las reforestaciones, por lo que estas se incluyen en su evaluación, y 3) las sinergias surgidas entre las reforestaciones y las obras de corrección hidráulica a lo largo de la consolidación de los objetivos específicos del proyecto. A modo de ejemplo se aplica la metodología a las cuencas de dos pequeños torrentes, Arratiecho y Arás, situadas en el Pirineo aragonés.

ABSTRACT.— Most of the water and forest restoration projects in mountain basins in Spain were carried out over 50 years ago and some were developed over a century ago. These projects were planned and implemented to secure a long term viability of activities in the mountain. They required important investments and caused deep transformations in the environment. Although they met the main objective of inhabiting the mountain, the evolution of society in the second half of the 20th century has not allowed to value their achievements, nor enjoying them. This put at risk the conservation of reforested forests and the maintenance of works in torrents to control floods in torrential events.

A methodology based on technic-scientific criteria is shown to analyse the transformation experimented by the mountain throughout the years by those projects, and to estimate the level of protection provided against natural hazards through: 1) the extent of the forest arising from reforestations; 2) the works carried out within the watersheds and their drainage courses, whose functioning is affected by the evolution of reforestations and is taken into account; 3) the synergies arising between reforestations and works along the consolidation of the specific objectives of the projects. The methodology is applied to the basin of two little torrents in the Aragonese Pyrenees, Arratiecho and Arás, to serve as an example.

KEY WORDS.— Natural hazards, protective forest, torrential floods, reforestation, torrent control, conservation measures, Aragonese Pyrenees.

ANTECEDENTES

El tiempo es consustancial en los proyectos forestales que impliquen reforestaciones. Si a ello se añade que se trata de proyectos específicos destinados a la protección frente a los peligros naturales de las personas, de sus bienes y de las infraestructuras de la montaña, se les ha presupuesto que reducen la vulnerabilidad ante los mismos conforme se consolidan los diferentes

estadios de las reforestaciones hasta alcanzar el bosque climácico o pseudoclimácico. Si, además, las cubiertas forestales son el resultado de reforestaciones ejecutadas en las áreas dominantes y de mayores pendientes de las cuencas de montaña, donde las precipitaciones son más abundantes, también se ha esperado de ellas que mejoren los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca, especialmente cuando en ella inciden aguaceros torrenciales. Basados en estos principios en la mayoría de los países del marco alpino europeo (Francia, Suiza, Austria, Italia, Alemania, etcétera), así como en Japón, han desarrollado en el pasado métodos para evaluar la rentabilidad (beneficios *ex ante*) de la restauración hidrológico-forestal (en adelante RH-F) de las cuencas de montaña apoyándose en criterios socioeconómicos. En España también se plantearon este tipo de metodologías utilizando para su valoración indicadores económicos como la relación beneficio / coste o la tasa interna de retorno (TIR); se citan como ejemplos las de AGUILÓ (1976) y GARCÍA ROBREDO (2000). Estos modelos no evalúan específicamente el modo en que inciden las condiciones físicas de la cuenca en la protección de los peligros naturales conforme se consolida el proyecto de RH-F; presuponen que si el proyecto cumple con sus objetivos se alcanza dicha protección.

Una forma diferente de evaluar la efectividad de los proyectos de RH-F en cuencas de montaña es el planteado por SARANDÓN y cols. (2007) en el marco del Proyecto EPIC-FORCE-INCO-CT2004-510739 (BATHURST y cols., 2010) y continuado por MINTEGUI y ROBREDO (2008). Esta metodología relaciona la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones torrenciales extraordinarias en una cuenca, con las condiciones físico-biológicas de la misma en el momento de recibirlas; a su vez, establece una conexión entre las precipitaciones extraordinarias y los efectos geotorrenciales que estas causan en la cuenca, clasificándolas en 1) daños menores, 2) daños mayores, 3) desastres y 4) catástrofes. En la figura 1 la magnitud de una precipitación extraordinaria se representa en el eje de ordenadas, expresada como probabilidad de ocurrencia, y en el eje de las abscisas se representan las condiciones físicas de la cuenca. El espacio comprendido entre ambos ejes queda dividido por las líneas A, B y C en cuatro zonas, que delimitan los cuatro tipos de daños señalados. Las tres rectas paralelas que aparecen perpendicularmente al eje de las abscisas representan: a) la situada a la izquierda, el estado físico de la cuenca antes de ejecutarse en ella los trabajos de RH-F, y b) las situadas en el centro y en la derecha, los estados

físicos de la cuenca tras la ejecución de dichos trabajos y conforme se consolidan sus efectos en ella. La estimación de los beneficios proporcionados por la RH-F queda representada en cada una de las tres rectas normales al eje de las abscisas, por la variación en la longitud de los segmentos que resultan en ellas al interceptar con las líneas A, B y C.

En este artículo se plantea evaluar la atenuación del geodinamismo torrencial en una cuenca de montaña que ha sido objeto de RH-F, respecto a lo que previsiblemente hubiera sido en ella de no haberse restaurado, utilizando de referencia las precipitaciones máximas ocurridas en ella desde que se tienen registros.

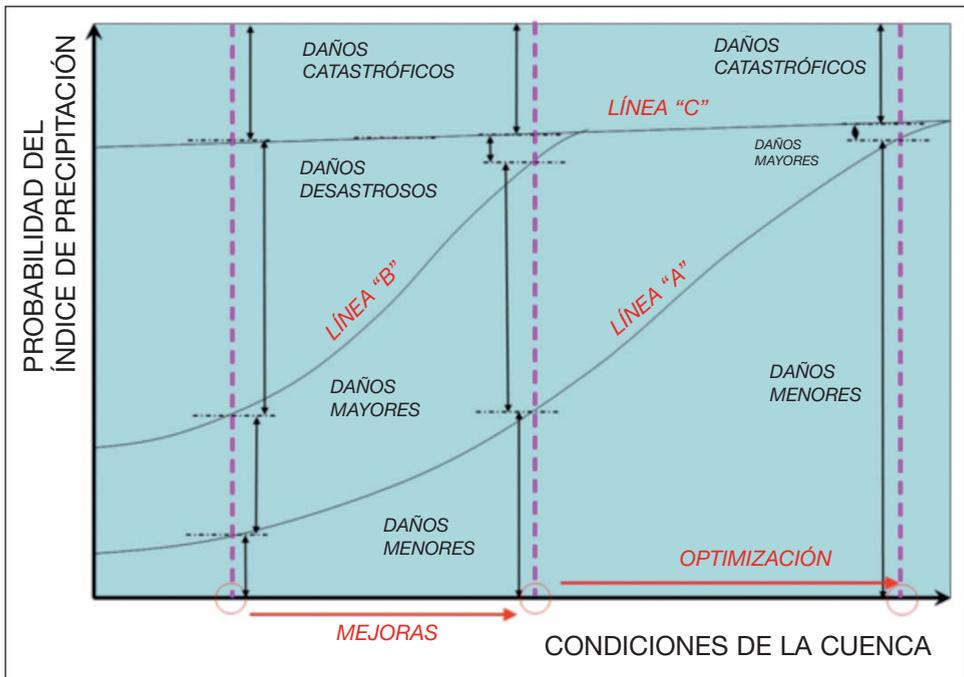


Fig. 1. Representación gráfica de los beneficios que le aporta la restauración hidrológico-forestal a una cuenca vertiente (por la mejora que supone de sus condiciones físico-biológicas) a partir de las tres rectas perpendiculares al eje de las abscisas: a) la de la izquierda representa el estado de la cuenca anterior a la ejecución en ella de los trabajos de restauración; b) las situadas en el centro y en la derecha, los estados físicos de la cuenca tras la ejecución de dichos trabajos, conforme se van consolidando sus efectos en ella. La estimación de los beneficios debidos a la restauración queda representada en dichas rectas, por la variación en la longitud de los segmentos que resultan en ellas al interceptar con las líneas A, B y C.

Para abordarlo se ha recurrido al concepto de *bosque o monte protector* atendiendo a las propiedades físicas de las masas arboladas clasificadas como protectoras. Es la línea que adopta Silva Project, un programa sobre bosques protectores iniciado en 2004 por la Confederación Helvética (LOSEY y WEHRLI, 2013), y el proyecto Interreg III (GAUQUELIN y COURBAUD, 2006; LICINI y PASQUETTAZ, 2006, DE FERRARI y BRUSCHINI, 2006). El texto de REY y cols. (2009) sintetiza los aspectos tratados en el Interreg III relacionados con el comportamiento de los bosques de montaña ante los riesgos naturales, por lo que se ha utilizado de referencia, junto con los *índices de protección del suelo por la vegetación* (GARCÍA NÁJERA, 1954, 1955; LÓPEZ CADENAS DE LLANO y BLANCO CRIADO, 1968), corroborados por GARCÍA DÍAZ y cols. (2002) en una de las líneas desarrolladas en el proyecto FOR-90-1005-C02-01 (SERRADA y cols., 1998).

OBJETIVO

Elaborar como una aproximación con criterios científico-técnicos una metodología, que en adelante se denominará *metodología de monte protector* o simplemente *metodología*, para evaluar la efectividad de los proyectos de RH-F en el control de los peligros naturales y consecuentemente de los riesgos naturales en la montaña, que permita justificar las inversiones necesarias para conservar las cubiertas forestales conseguidas con dichos proyectos y mantener las obras de protección ejecutadas con los mismos.

METODOLOGÍA DE MONTE PROTECTOR Y MODO DE APLICACIÓN EN UNA CUENCA DE MONTAÑA

Metodología de monte protector

La *metodología* propuesta en FÁBREGAS (2015) plantea evaluar los efectos de la RH-F ante los riesgos naturales en la montaña basándose en el concepto de *bosque o monte protector* y considera tres aspectos: 1) la protección que proporcionan las cubiertas forestales, tanto si son de regeneración natural como si proceden de reforestación; 2) la que aportan las obras ejecutadas en los cauces torrenciales y en las cuencas que vierten a ellos, que en el ámbito de la RH-F se vinculan con las reforestaciones, por lo que a estas se les incorpora en su evaluación, y 3) las sinergias que surgen entre

las reforestaciones y de las obras ejecutadas en los cauces y en la cuenca, conforme se consolidan las primeras; que se estiman atendiendo al grado de cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto de RH-F.

Protección que proporcionan las cubiertas forestales

Se asume que el nivel de protección de un tipo de cubierta forestal ante un riesgo natural determinado es función del grado que alcanza dicha cubierta en un baremo de niveles de protección de las cubiertas forestales, que se establece experimentalmente a partir de determinados parámetros que identifican su estructura. Para establecer dicho baremo, cuyo objetivo final es definir las características del monte protector eficaz y sus niveles previos hasta alcanzarlo, se apoya en dos premisas: a) las experiencias realizadas con diferentes tipos de cubiertas forestales en los países del área alpina y en las propias experiencias, y b) el conocimiento físico de las cubiertas forestales que son objeto de la evaluación, que se obtiene mediante su inventario y su correspondiente proyecto de ordenación, con la consiguiente división en rodales. Por tanto, solo es posible aplicar la *metodología* si previamente se conoce el *estado físico de la cubierta forestal* de la cuenca a la que se pretende aplicar. Se asume que la *metodología* constituye una primera aproximación y aborda los cuatro tipos de riesgos naturales característicos en la montaña: 1) crecidas torrenciales, 2) desprendimientos de aludes, 3) caídas de bloques y 4) deslizamientos del terreno (tabla 1), pero en los ejemplos de este artículo se limita a evaluar el primero.

Para estructurar la *metodología* se plantean las tres operaciones siguientes: 1) asignar para cada riesgo natural los parámetros de la cubierta forestal y del medio donde se ubica que se estiman que ejercen mayor control ante dicho riesgo, estableciendo el porcentaje con el que contribuyen cada uno de ellos; 2) ponderar dichos parámetros en función del estado en que se encuentran para intervenir ante el riesgo que se analiza; para lo que se establece un baremo de 1 (mínima incidencia) a 5 (máxima incidencia); esta asignación exige que cada parámetro disponga de su propia escala de desarrollo o de intensidad atendiendo a sus singularidades (por ejemplo, su grado de desarrollo, su evolución, sus dimensiones, etcétera), y 3) volcar el resultado de las dos operaciones anteriores sobre los rodales previamente establecidos con la ordenación de las cubiertas forestales objeto de la evaluación.

Tabla 1. Metodología basada en el concepto de *monte protector* para evaluar los efectos de la restauración hidrográfico-forestal de las cuencas de montaña ante los riesgos naturales.

<i>Motivo y objetivo de la metodología</i>		<i>Actuaciones y resultados de un proyecto de restauración hidrográfico-forestal</i>			<i>Evaluación de la protección de las cuencas ante los riesgos naturales en la montaña conseguidos a través de la restauración hidrográfico-forestal</i>		
		<i>Actuaciones</i>	<i>Resultados</i>	<i>Procedimientos</i>	<i>Criterios</i>	<i>Protecciones parciales debidas a</i>	
		<i>Trabajos</i>	<i>Cubiertas forestales.</i>	<i>Análisis de los parámetros de las cubiertas forestales que inciden en la protección de la cuenca ante los riesgos naturales (adecuación de las experiencias de proyectos europeos al Pirineo aragonés).</i>	<i>Definición de tipo de unidad protectora (TUP) y tipo de monte protector (TMP).</i>	<i>Efecto final</i>	
<p>a) En el pasado se ejecutaron en las cuencas de montaña trabajos y obras para prevenir riesgos naturales.</p>		Reforestaciones.	Cubiertas forestales.			Las cubiertas forestales ante las crecidas torrenciales.	Conforme los trabajos y obras de RHF se consolidan se deben ir cumpliendo los objetivos del proyecto.
		Estabilización de vertientes con sistemización del terreno e implantación de vegetación leñosa.	Cubiertas forestales.			Las cubiertas forestales ante el desprendimiento de aludes.	
<p>b) Se trata de evaluar sus resultados, para justificar las inversiones precisas para mantenerlos en buen estado y con ello garantizar su eficiencia.</p>		Diques de corrección de torres.	Control de las crecidas torrenciales.	a) Analizar el mayor número de eventos torrenciales aleatorios que hayan podido incidir en las obras.		Las cubiertas forestales ante los deslizamientos del terreno.	
		Obras de fijación del manto de nieve.	Defensa contra aludes.			Las cubiertas forestales ante el riesgo de caída de bloques.	
		Actuaciones para estabilizar las laderas.	Reducir las pendientes de las laderas.	b) Analizar el estado que presentan las obras tras los impactos de dichos eventos.	Definición de unidad específica de protección (UEP), siguiendo a REY y cols., 2009).	Las cubiertas forestales ante los riesgos múltiples.	Las obras operan conforme evoluciona la cubierta forestal de la repoblación y se evalúan sus efectos junto con ella.
		Medidas de control ante la caída de bloques.	Evitar caídas y retener los bloques.				Retención de bloques con el arbolado; con redes u otros tipos de infraestructuras.

Estas operaciones permiten: a) correlacionar cada riesgo con los parámetros de la cubierta forestal y de su medio que contribuyen a su control, de modo que el conjunto de los parámetros represente el efecto global (100%) sobre el riesgo en cuestión desde el punto de vista funcional; b) establecer la intensidad con la que cada parámetro incide ante el riesgo analizado, y c) visualizar en la montaña el efecto protector de las cubiertas forestales a través de los rodales.

Con la *metodología* los rodales mantienen su sentido dasocrático e incorporan una nueva función como unidades que presentan un comportamiento prácticamente uniforme ante el riesgo natural concreto que se analiza a través de ellas; por lo que dentro de su nuevo cometido se les denomina *tipo de unidad protectora*, en lo sucesivo TUP. La *metodología* proporciona un valor cuantitativo determinado a los TUP que oscila entre 100 y 500, aunque en la práctica los valores habituales se sitúan alejados de ambos extremos. La operación 1, que selecciona los parámetros con mayor incidencia en el control del riesgo que se evalúa, eleva dicho valor hasta 100, y la operación 2, que establece la intensidad con la que cada parámetro actúa en función de su estado físico, lo pondera mediante un factor que oscila entre 1 y 5. La protección más baja ante el riesgo analizado queda definida por el valor 100 y la más alta por 500.

En la situación más general, que contempla los cuatro riesgos analizados con la *metodología*, se prevé que esta utilice hasta doce parámetros que son los siguientes: 1) tipo de cubierta vegetal; 2) fracción de cabida cubierta: FCC (%); 3) densidad (número pies/ha); 4) diámetro medio de los árboles: D (cm); 5) altura media de los árboles: H (m); 6) esbeltez (relación altura / diámetro: H/D); 7) área basimétrica ($m^2 \cdot ha^{-1}$); 8) heterogeneidad de la formación o masa forestal; 9) formación principal (para establecer la irregularidad de la masa forestal); 10) vigor de la masa forestal; 11) tipo de suelo y 12) pendiente media del terreno (%). Pero para cada uno de los riesgos analizados en particular utiliza unos parámetros y prescinde de otros. En este artículo se atiende únicamente al riesgo por crecidas torrenciales, por lo que los parámetros utilizados se limitan a los siete siguientes: 1), 2), 3), 8), 9), 11) y 12).

Continuando con la situación general, para establecer las intensidades con las que cada parámetro incide ante el riesgo analizado (operación 2) se ha elaborado la tabla II; que muestra las singularidades de cada parámetro y el

Tabla II. Estados de desarrollo de los parámetros de la cubierta forestal y de su medio que condicionan su incidencia sobre el riesgo natural analizado.

<i>Incidencia de los parámetros de menor a mayor (de arriba abajo en la tabla) en el control de los riesgos naturales</i>					
<i>Tipo de cubierta vegetal</i>	<i>Fracción de cabida cubierta (%)</i>	<i>Densidad (número pies/ha)</i>	<i>Área basimétrica (m²·ha⁻¹)</i>	<i>Tipo de suelo</i>	<i>Pendiente del terreno (%)</i>
Terreno desnudo	< 15	< 250	< 5	Roca – litosuelo	> 70
Prado	15-29	250-499	5-14,9	Suelo superficial	35-70
Pastizal abierto (< 50% cobertura)	30-49	500-999	15-24,9	Suelo poco desarrollado	34,9-12
Pastizal denso (> 50% cobertura)	50-70	1000-1500	25-34,9	Suelo medio de ladera	< 12
Pastizal / Matorral (< 50% matorral)	> 70	> 1500	35-50	Suelo profundo	
Matorral bajo (> 50% matorral; h < 1 m)			> 50		
Matorral alto (> 50% matorral; h > 1 m)					
Bosque muy abierto (FCC < 15%)					
Bosque abierto (15 < FCC < 30%)					
Bosque (30 < FCC < 70%)					
Bosque denso (FCC > 70%)					
Heterogeneidad de la masa forestal	Formación de la masa forestal	Vigor de la masa	Altura media de los árboles (m)	Diámetro medio de los árboles (cm)	Relación altura / diámetro
Masa monoespecífica	Masa coetánea	Muy bajo	< 4	< 4	> 100
Masa monoespecífica con especies acompañantes y abundante matorral	Masa con dos clases de edad	Bajo	4-5,9	4-5,9	100-80
Masa con dos especies principales (coníferas)	Masa con tres clases de edad	Medio	6-9,9	6-9,9	79,9-60
Masa con dos especies principales (conífera + frondosa)	Masa irregular en bosquetes	Alto	10-14,9	10-14,9	59,9-40
Masa muy heterogénea	Masa irregular	Muy alto	15-20	15-20	< 40
			> 20		

modo en que es posible precisar su grado de implicación ante el riesgo analizado. Esta tabla se complementa con la elaboración para la cuenca objeto de estudio de los mapas temáticos de cada uno de los parámetros.

Establecidos los TUP, mediante una integración ponderada de los mismos de tipo cuantitativo, la *metodología* establece cuatro *tipos de montes protectores* (TMP), que los adopta como base para definir la protección de las diferentes cubiertas forestales ante los distintos riesgos naturales analizados. Los rangos entre los que se sitúan los cuatro tipos de TMP son:

- 1) Protección muy buena: $TMP > 350$;
- 2) Protección buena: $350 > TMP > 250$;
- 3) Protección regular: $250 > TMP > 150$, y
- 4) Protección deficiente: $TMP < 150$.

Definidos los TMP, se determinan las superficies que ocupan en la cuenca cada uno de ellos; lo que permite: a) tener localizados geográficamente en la cuenca las superficies con distintos niveles de protección ante el riesgo natural analizado, y b) obtener una media ponderada de la protección de la cuenca ante dicho riesgo natural.

Protección que proporcionan las obras ejecutadas en los cauces y en la propia cuenca

La protección que aportan las obras hidráulicas de corrección se evalúa considerando a las cuencas en las que se ubican como *unidades específicas de corrección* en línea con lo planteado por REY y cols. (2009) y analizando su comportamiento ante el mayor número posible de eventos torrenciales que inciden en ellas. Para ello, se opera con todas las precipitaciones registradas en la estación o estaciones meteorológicas, situadas en la propia cuenca o en su entorno más próximo, de serie histórica más larga y verificando *a posteriori* las incidencias ocurridas en la cuenca en dicho periodo, junto con la evolución temporal de las reforestaciones que se ejecutaron en ella durante su RH-F. Tratándose de periodos de análisis cortos, se puede considerar el estado en que quedan las obras tras cada episodio torrencial, como lo plantean DELL'AGNESSE y cols. (2013). Las razones para operar de este modo se resumen a continuación.

La mayor preocupación de los ingenieros en la planificación y la ejecución de la RH-F de una cuenca de montaña degradada es el control de la carga de sedimentos que las precipitaciones torrenciales pueden proporcionar a los caudales de crecida de los torrentes que drenan por ellas, porque la incorporación de dicha carga sólida a la corriente incrementa en esta su peso específico y su tensión de arrastre, y altera las condiciones de circulación del flujo, pudiéndose modificar las hipótesis con las que se diseñó la corrección hidráulica del curso. Esta cuestión ya fue observada por SURREL (1841), que propuso como solución la repoblación de la cuenca del torrente. Cabe añadir que el incremento de la tensión de arrastre de la corriente puede llegar a afectar a la estabilidad de las laderas que vierten directamente a los torrentes.

Está comprobado que la vegetación leñosa, especialmente la arbórea, regula los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca vertiente en el transcurso de las precipitaciones torrenciales, reduciendo con ello la carga sólida de la corriente y contribuyendo a la sujeción de las laderas. Como resultado de estos efectos, disminuye también la superficie de inundación en las áreas dominadas de la cuenca y en el volumen de los sedimentos depositados en ellas (MINTEGUI y ROBREDO, 2008). Por ello, en los proyectos de RH-F las reforestaciones se consideran esenciales para asegurar la funcionalidad de las obras de corrección hidráulica y prolongar su vida útil, consolidándose estos efectos conforme evolucionan las reforestaciones. Aunque en este proceso también pueden surgir problemas secundarios que se comentan más adelante.

Protección surgida de las sinergias entre las obras hidráulicas de corrección de los cursos torrenciales y las reforestaciones de sus cuencas vertientes

Para evaluar dichas sinergias mientras se consolida el proyecto de RH-F, se apoya en el grado de cumplimiento de sus principales objetivos, asumiendo que por su propia dinámica los resultados de un proyecto de RH-F se consiguen o se verifican a medio y largo plazo, intervalo en el que pueden surgir distintos imponderables. En cualquier caso, la restauración de las cuencas de montaña no implica la desaparición en ellas de todos los riesgos, sino un control de estos y la consiguiente reducción de sus efectos.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANTE EL RIESGO
DE CRECIDAS TORRENCIALES EN DOS CUENCAS DEL PIRINEO ARAGONÉS

Las dos condiciones ineludibles para poder aplicar la *metodología* son 1) que la cuenca en cuestión haya sido objeto de una RH-F en el pasado, y 2) que se disponga de un conocimiento suficiente del estado actual de sus cubiertas forestales, lo que implica la ordenación de sus masas arboladas y la definición de los rodales en ellas.

Las cuencas elegidas son las de los torrentes de Arratiecho y de Arás, que discurren respectivamente por las márgenes izquierda y derecha del río Gállego en el municipio oscense de Biescas. La corrección de ambos torrentes tuvo su origen en la búsqueda de una solución a los repetidos cortes de la carretera nacional N-260 que atraviesa sus respectivos conos de sedimentación, causados por las continuas crecidas de ambos cursos. Para la cuenca del torrente de Arratiecho se redactó un único proyecto de RH-F, que se ejecutó entre 1903 y 1907. Para la cuenca del torrente de Arás se han redactado tres proyectos de RH-F: el primero se ejecutó entre 1907 y 1912, el segundo entre 1930 y 1964 y el tercero entre 1996 y 2000. Este artículo aborda únicamente los dos primeros; el tercero, junto con un análisis de la catástrofe ocurrida en este torrente la tarde-noche del 7 de agosto de 1996, se analizará en un artículo posterior. Esta separación se debe a que la *metodología* no está especialmente diseñada para analizar acontecimientos aislados, sino el comportamiento de la cuenca en el tiempo y a largo plazo tras la ejecución de su RH-F, en el que suceden crecidas torrenciales tanto extraordinarias como ordinarias, siendo las últimas más frecuentes y, con el paso del tiempo, suelen tener mayor repercusión en la cuenca, aunque esta circunstancia pase desapercibida.

A continuación se describen las dos cuencas que son objeto de aplicación de la *metodología*, y *a posteriori* se concretan las operaciones efectuadas para aplicarla.

Descripción de las dos cuencas objeto de estudio

Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho

Situada muy próxima al núcleo de población de Biescas (fig. 2), morfológicamente es una típica cuenca torrencial de montaña, en la que se diferencian



Fig. 2. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho. Izquierda: límites de la cuenca, su proximidad al núcleo de población de Biescas y paso por su área dominada de la carretera N-260. Derecha: vista del cono de sedimentación del torrente y del trazado de la N-260 por el mismo, en marzo de 2012.

el área vertiente o de recepción, la garganta y el cono de sedimentación. Tiene una superficie de 1,60 km²; su cota máxima y mínima son 1667 y 860 msnm, respectivamente, y su pendiente media del 52,81%. El torrente tiene una longitud de 2,74 kilómetros y una pendiente media de 0,30 m·m⁻¹. Los suelos predominantes en la cuenca son *flysch* coluviales, pero en su vertiente noreste presenta un pequeño manto de depósitos morrénicos que ocupa unos 0,06 km². Actualmente, toda su área vertiente está prácticamente cubierta por una masa forestal, compuesta básicamente por pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y monte de quejigo (*Quercus faginea*). Las crecidas torrenciales son el riesgo principal en esta cuenca y la carretera N-260, que atraviesa su cono de sedimentación, junto con el área recreativa y los aprovechamientos agropastorales emplazados en dicho cono, son los elementos más expuestos a ellas. En menor medida también afecta a algunas pistas forestales y/o agrícolas y senderos de montaña de la cuenca (FÁBRIGAS y cols., 2011).

Estado físico del torrente de Arratiecho y de su cuenca vertiente al inicio del siglo xx: descripción y justificación de las obras y trabajos realizados en ambos con la RH-F entre 1903 y 1907

A comienzos del siglo xx la cuenca del torrente de Arratiecho estaba prácticamente deforestada y profundamente degradada. Por ello, cada vez

que ocurrían precipitaciones torrenciales, se iniciaba en ella un intenso geodinamismo torrencial ocasionándole: a) una fuerte erosión lineal en su cauce; b) el transporte por las crecidas del torrente de los sedimentos arrancados de su propio lecho, junto con los materiales acumulados en él procedentes de la denudación de la cuenca y su posterior arrastre por las escorrentías de ladera hasta el mismo, y c) la expansión de la corriente y de los sedimentos transportados por ella en su desplazamiento por el cono de sedimentación del torrente. A ello se unía un proceso de erosión generalizado en la cuenca, incluyendo deslizamientos superficiales en su área dominante y en la ladera noreste ocupada por la morrena, causando un paulatino deslizamiento de esta hacia el torrente. En conjunto, la cuenca estaba sometida a una pérdida importante de suelo y apuntaba síntomas de desertificación.

Las situaciones de inestabilidad mencionadas causaban repetidos cortes en la carretera N-260 que atraviesa su cono de sedimentación, aislando a la población de Biescas de los núcleos de población vecinos situados al este, además de provocar múltiples daños en los cultivos y pastizales de sus áreas dominadas (fig. 3).

Ante el escenario expuesto, el ingeniero de montes don Pedro de Ayerbe de la Sexta División Hidrológico-Forestal ubicada operativamente en Huesca redactó el proyecto de corrección del torrente de Arratiecho y, tras su aprobación, dirigió su ejecución entre 1903 y 1907. El proyecto abordó: a) la estabilización de toda la ladera de la vertiente noreste (fig. 4); b) el control

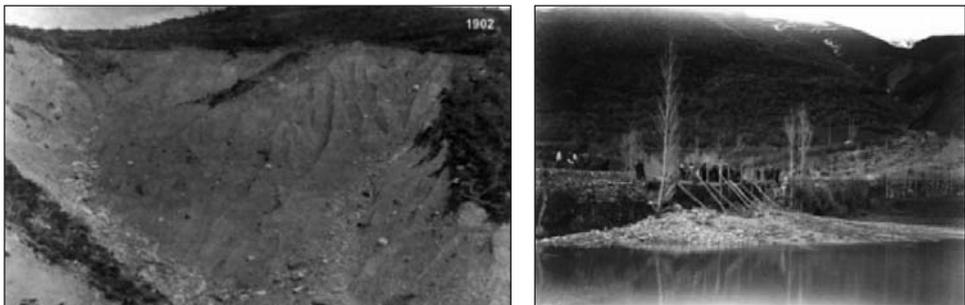


Fig. 3. Cuenca vertiente al barranco de Arratiecho a comienzos del siglo XX.

Izquierda: erosión remontante en la cabecera de la cuenca hacia 1902.

(Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)

Derecha: corte de la carretera N-260 por una crecida del barranco de Arratiecho hacia 1905. (Fotografía de la familia Ayerbe)

de la erosión remontante en el torrente de Arratiecho y en los barrancos secundarios (figs. 5 y 6); c) el control de la erosión superficial en todas las laderas vertientes al mismo mediante reforestación (fig. 5), y d) la evacuación controlada y rápida de los caudales de avenida del torrente de Arratiecho en el tramo de su cono de sedimentación (fig. 7).

Se realizaron obras y trabajos en las tres zonas de la cuenca: 1) área de recepción, 2) garganta y 3) cono de sedimentación.

a) Para estabilizar la ladera noreste de la cuenca se abancaló su perfil, lo que permitió regular las pendientes de los tramos resultantes de la ladera y reforestar las superficies niveladas. De este modo se dotó a la ladera de la pendiente y la permeabilidad adecuadas para dirigir sus escorrentías al



Fig. 4. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho hacia 1904. Trabajos de estabilización de la ladera noreste por la Sexta División Hidrológico-Forestal. (Izquierda: fotografía de la familia Ayerbe. Derecha: Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)

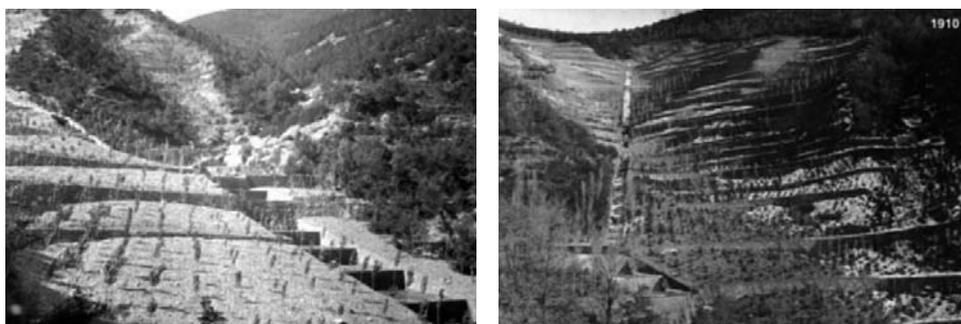


Fig. 5. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho hacia 1910. Encauzamiento del cauce principal y obras y trabajos de reforestación realizados en el área de recepción de la cuenca. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)



Fig. 6. Diques de mampostería hidráulica de primer orden en la garganta del torrente de Arratiecho hacia 1904. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004).

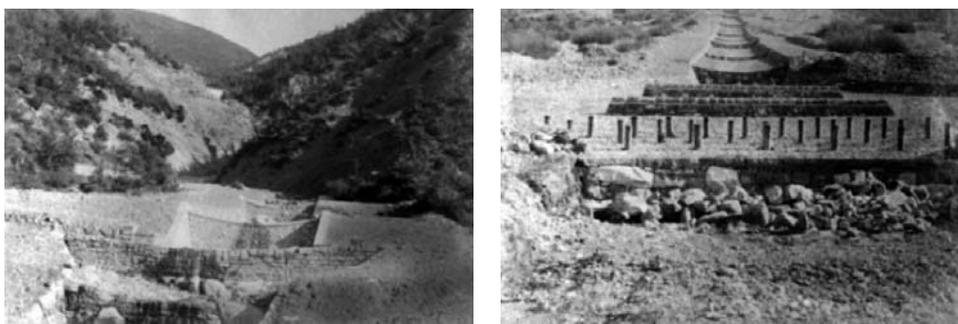


Fig. 7. Encauzamiento del torrente de Arratiecho en su cono de sedimentación para asegurar el servicio de la carretera N-260, hacia 1904. Izquierda: primer tramo, inmediatamente aguas arriba de la carretera N-260. Derecha: segundo tramo, aguas abajo de la misma carretera. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)

curso principal, bien directamente o a través de barrancos intermedios afluentes al mismo; en conjunto el sistema de drenaje adoptó el esquema que se conoce como espina de pescado (figs. 4 y 5, imágenes de la derecha). Los muros del abancalado se levantaron con las margas calizas más resistentes del *flysch* de la ladera. Con esta medida, a la vez que se conseguía una evacuación ordenada de los volúmenes de agua disponibles en la cuenca en momentos torrenciales y postorrenciales, se evitaba también la erosión de sus suelos por acción de las escorrentías, que con anterioridad a la ejecución del proyecto circulaban descontroladas ladera abajo.

b) Para controlar la erosión remontante en el torrente de Arratiecho se encauzó su recorrido (desde el inicio de su garganta hasta el final de su cono

de sedimentación) y a lo largo de este encauzamiento se construyeron 70 diques de mampostería hidráulica transversales al cauce (figs. 5, 6 y 7). En julio de 2016, se realizó un levantamiento topográfico a dicho encauzamiento (desde el final de su cono de sedimentación hasta el inicio de su garganta) (PÁRRAGA, 2016), diferenciándose cuatro tramos. El primero de ellos atraviesa el cono de sedimentación del torrente, pero ello se comenta posteriormente en el epígrafe d), los tres restantes corresponden al presente epígrafe. El segundo tramo abarca desde el final de la garganta (fig. 7, imagen izquierda) hasta un gran salto natural del propio curso; tiene una longitud de 205 metros y salva una altura de 45 metros, el canal presenta una anchura constante de 5 metros y en él se sitúan 18 diques transversales, de los que 16 presentan alturas comprendidas entre 1,5 y 3 metros y los dos restantes, considerados de primer orden (fig. 6), tienen alturas de 4 y 6 metros, respectivamente. El tercer tramo está pasado el intervalo del citado salto natural y llega hasta otro gran salto natural del torrente, tiene una anchura constante de 6 metros, una longitud de 164 metros y salva un desnivel de 46 metros; el tramo comienza en un dique de primer orden de 10 metros de altura (posiblemente se corresponda con la imagen central de la figura 6) y tiene otros 20 diques de alturas comprendidas entre 0,5 y 3 metros. El cuarto y último tramo comienza al inicio del segundo gran salto natural y termina al inicio de la garganta, donde existe un dique de cierre de 1,50 metros de altura totalmente cubierto por la vegetación del lugar. La anchura de este tramo es de 5 metros, su longitud de 144 metros y salva un desnivel de 44 metros; además del dique de cierre, tiene otros 13 diques, uno de ellos de primer orden de 6 metros de altura y los restantes diques presentan alturas comprendidas entre 0,6 y 3 metros.

c) Para controlar la erosión superficial en las laderas vertientes al barranco de Arratiecho se llevó a cabo su reforestación, que afectó aproximadamente a un 50% de la cuenca, incluyendo la ladera noreste y todas aquellas superficies directamente asociadas con las obras, por ser vertientes directas a ellas (dicha repoblación se destaca por el color verde en la imagen de la derecha de la figura 2). La especie principal utilizada fue el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), pero en las zonas de cotas más bajas se empleó también el quejigo (*Quercus faginea*) y en las márgenes de los cursos de drenaje de la cuenca, especialmente del torrente de Arratiecho, y a los pies de la mayor parte de las obras hidráulicas se introdujeron plantones de aliso (*Alnus glutinosa*) para enriquecer y sujetar los suelos.

La reforestación se planteó para consolidar a lo largo del tiempo la estabilización de las tierras del escenario de la restauración y como herramienta complementaria a las obras hidráulicas de corrección. Con ella se protegían también las áreas dominadas de la cuenca, las de mayor valor agronómico, dedicadas a cultivos y pastizales.

d) Con el encauzamiento mencionado del torrente de Arratiecho en el tramo de su cono de sedimentación, se aseguraba la evacuación controlada y rápida de sus caudales de crecida hacia el río Gállego por su margen izquierda, evitando la expansión y divagación de su corriente por las áreas dominadas de la cuenca que constituyen su cono y garantizando el tránsito en la carretera N-260 a la salida de Biescas hacia las poblaciones de la comarca situadas al este, y la seguridad de las áreas dominadas. En el tramo que se comenta, el encauzamiento está escalonado mediante 17 diques transversales de alturas comprendidas entre 0,5 y 1 metros (fig. 7, imagen derecha); tiene una anchura constante de 5 metros; una longitud de 425 metros y salva un desnivel de 50 metros. La superficie del cono de sedimentación más próxima al canal escalonado también fue objeto de repoblación (fig. 2, imagen derecha).

Cuenca vertiente al torrente de Arás

La cuenca vertiente al torrente de Arás se encuentra algo más alejada del núcleo de población de Biescas (fig. 8), tiene mayor extensión, 19,25 km², e incluye las tres pedanías de Sobremonte: Aso, Yosa y Betés. Es también una típica cuenca torrencial de montaña con su área de recepción, su garganta y un gran cono de sedimentación que ocupa 0,69 km². Su cota máxima y mínima son 2190 msnm (en el pico de Peña Petrus) y 837 msnm (en su afluencia en el río Gállego por su margen derecha); tiene una pendiente media del 46% y morfología ovalo-redonda. El curso principal recibe el nombre de *torrente de Aso* hasta su confluencia con el barranco de Furcos cerca del poblado de Aso; a partir de esta unión toma el nombre de torrente de Arás y tiene dos afluentes principales, el torrente de Betés por la izquierda (con una cuenca de 4,30 km²) y el torrente de la Selva o de Yosa por la derecha (con una cuenca de 2,53 km²), ambos muy torrenciales. La pendiente media del torrente de Arás es de 0,14 m·m⁻¹ y la de sus afluentes 0,18 m·m⁻¹ y 0,17 m·m⁻¹, respectivamente. Geológicamente

la formación predominante en la cuenca es un *flysch* del Eoceno, constituido por una alternancia de capas de areniscas y margas; pero una parte de su superficie, que incluye a su divisoria meridional en la zona de garganta, está constituida por una capa de morrena muy erosionable de origen glaciario, capaz de proporcionar al torrente un caudal sólido muy importante durante las crecidas. Según NICOLÁS (2001) la cubierta vegetal de esta cuenca presenta un 42% de arbolado; un 14% de matorrales puros o mezclados con arbolado; un 20% de prados y cultivos y un 24% de pastizales de montaña y roca desnuda.

El principal riesgo natural en esta cuenca son las crecidas del torrente de Arás. También existen zonas de aludes en su cabecera y deslizamientos, asociados sobre todo a las laderas vertientes a los cauces, así como desprendimientos de bloques, pero sus impactos son menos importantes. El elemento más directamente expuesto en la cuenca es la carretera N-260 que corta al cono de sedimentación del torrente de Arás. Indirectamente resultan afectados el entorno agrícola de los núcleos de Aso y Yosa y el propio núcleo de Betés, y algunas pistas forestales y/o agrícolas (FÁBREGAS, 2011).



Fig. 8. Cuenca vertiente al torrente de Arás. Izquierda: representación tridimensional de la cuenca en la que se aprecia a la derecha la población de Biescas y el paso de la carretera N-260 por el cono de sedimentación del torrente. Derecha: vista de la cuenca en abril de 1998, en primer término aparece el cono de sedimentación con su primitivo canal escalonado que se dirige desde el centro hacia la izquierda de la fotografía; en el centro la garganta del torrente y al fondo parte del área de recepción de la cuenca. (Fuente: NICOLÁS, 2001)

Estado físico del torrente de Arás y de su cuenca vertiente a comienzos del siglo XX: descripción y justificación de las obras y trabajos de RH-F ejecutados en ellos entre 1907 y 1964

MARRACO (1999) se refiere al pasado del torrente en los siguientes términos:

el torrente Arás cortaba varias veces al año la carretera de acceso al valle de Tena, al punto que el coche de línea de la Hispano-Tensina disponía, debidamente guardados al borde del torrente, de unas barras de madera con enganches para acoplar a los radios de las ruedas, que los pasajeros detenidos por la riada empleaban a modo de andas para alzar y transportar a hombros el autobús al otro lado del torrente y seguir el viaje [fig. 9, imagen izquierda]. Las obras de corrección tropezaron siempre con la existencia de tres pueblos, Aso, Yosa y Betés —el Sobremonte— extendidos sobre un llano cultivable, imposible de repoblar sin afectar a su supervivencia, que forma la mayor parte de la cuenca de recepción, constituida por una morrena glaciar lateral desbordante hacia el río Aurín, de forma que la garganta del Arás, que la corta en el desagüe, aparece como un caos de material inestable.

NICOLÁS (2001), refiriéndose a una publicación del Cuerpo Nacional de Ingenieros de Montes de 1909, comenta:

aunque fuera posible que a finales del siglo XIX se ejecutaran algunas correcciones para paliar los daños causados por el torrente de Arás; la solución integral del problema mediante el encauzamiento del torrente y la RH-F de su cuenca vertiente no se aborda hasta el año 1907, cuando la Administración encarga a don Pedro de Ayerbe la redacción y posterior ejecución del primero de los tres proyectos de RH-F llevados a cabo en el torrente de Arás, al que se estima que se dedicó hasta 1912.



Fig. 9. Izquierda: cruce del torrente de Arás en su cono de sedimentación durante una de sus crecidas anuales hacia 1910. Derecha: tramo medio del torrente de Arás antes de su corrección hacia 1930. (Fotografías de la familia Ayerbe)



Fig. 10. Dos vistas del torrente de Arás hacia 1910. Izquierda: dique de cierre al final de la garganta del torrente. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)
Derecha: obras en el canal escalonado que atraviesa el cono de sedimentación del torrente. (Fotografía de la familia Ayerbe)

La filosofía adoptada fue la clásica: a) se inició ejecutando los trabajos hidráulicos de corrección del torrente de Arás, para resolver o al menos paliar los problemas causados por sus desbordamientos en el cono de sedimentación, y b) se simultanearon los trabajos citados con la restauración de su cuenca alimentadora, tratando de sujetar las laderas vertientes al torrente mediante una cubierta forestal apropiada, para reducir la emisión de caudal sólido al torrente durante sus crecidas y facilitar con ello la evacuación de su corriente hacia el río Gállego. Documentos de la época señalan que para el año 1908 estaba construido un gran dique de cierre al final de la garganta del torrente de 8,40 metros de altura desde sus cimientos y una anchura variable entre sus márgenes desde 27 a 49,9 metros (fig. 10, imagen izquierda).

Su vertedero tenía forma trapezoidal de 17 metros de longitud media y 1 metro de altura, suficiente para evacuar los caudales aforados hasta la fecha. La obra se completaba con un contradique de doble escalón, para que la corriente, tras pasar por el vertedero, laminara su energía antes de entrar en el canal escalonado de evacuación proyectado aguas abajo del dique. Este canal de 1300 metros atravesaba todo el cono de sedimentación del torrente en línea de máxima pendiente, permitiendo la descarga de los caudales de crecida del torrente de Arás directamente al río Gállego (fig. 10, imagen derecha), evitando con ello los cortes de la carretera a Francia y Panticosa (la actual N-260), y asegurando al mismo tiempo los cultivos y pastizales de

la zona. Los documentos de la época señalan que para el año 1911 estaban contruidos 1000 metros de canal que, además de resolver la evacuación de los caudales de avenida en el lugar, se estimaba que se habían recuperado unas 15 hectáreas del cono de sedimentación del torrente para cultivos o pastizales.

Las obras efectuadas en el torrente de Arás y los trabajos de reforestación ejecutados en su cuenca vertiente entre 1907 y 1912, aportaron en su momento una solución satisfactoria a los problemas del paraje que se comenta; pero no los resolvieron de un modo definitivo, debido al comportamiento intensamente torrencial del Arás que exigía un seguimiento y mantenimiento permanente del mismo, en ocasiones inasumible por la falta de un presupuesto adecuado.

Según NICOLÁS (2001) no se conocen los acontecimientos que ocurrieron en los años posteriores, pero cuando en 1930 el ingeniero de montes don Mariano Borderas redacta un nuevo proyecto, en cumplimiento de la Real Orden de 12 de abril de 1929, el panorama debía ser de nuevo desolador según se desprende de su memoria, en la que refiriéndose al cono de sedimentación del torrente de Arás expone: “antiguamente emplazamiento de las mejores huertas de Biescas y en la actualidad invadidas por las gravas y materiales procedentes del torrente, lo mismo que la carretera a Francia que en un trayecto de 1300 metros permanece cortada e interrumpido el tránsito durante una gran parte del año”. El nuevo proyecto mostraba una idea bastante precisa de la situación y en el plano levantado al canal de evacuación aparecían dos discontinuidades: una hacia la mitad de unos 35 metros y otra de unos 115 metros aguas abajo del dique de cierre. Además, su longitud desde el dique de cierre hasta la entrega de los caudales de avenida al río Gállego medía 1085 metros; por lo que la cifra de 1300 metros del proyecto anterior podía incluir las obras de consolidación de la garganta del torrente en 215 metros.

El autor definió el estado de la garganta del torrente de preocupante y en su nuevo proyecto propuso para ella 11 diques de consolidación, de alturas de entre 4 y 8,5 metros sobre los cimientos y con sus correspondientes contradiques, ubicándose los dos superiores aguas arriba de la confluencia del torrente de Betés, a la altura de la población de Yosa. Para su diseño y cálculo adoptó un caudal de crecida (de proyecto) de $125 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, valiéndose para

ello de las observaciones hechas en distintos puntos del cauce tras la tormenta del 11 de junio de 1929, la mayor que se recordaba hasta entonces, que registró 50,1 milímetros en hora y media. Asimismo, para sujetar las laderas de la garganta, propuso realizar enfagados, palizadas y muretes, de altura inferior a 2 metros siguiendo curvas de nivel. En los intervalos entre los muretes se colocarían las barreras vegetales, constituidas por entrelazados de ramas entre piquetes clavados por lo menos 0,5 metros en el terreno. Proyectó un total de 25 000 m³ de mampostería mixta para muretes y 30 kilómetros de barreras vegetales.

En el capítulo de las reforestaciones, el autor estimó la superficie disponible para las repoblaciones y pastos en 850 hectáreas, de las que consideró necesario destinar a pastos 350, para cubrir las necesidades de la población del lugar; asimismo, describió el estado de las repoblaciones ejecutadas en la etapa del proyecto anterior, como masas interrumpidas de *Pinus sylvestris*, medianamente conformadas y de escasa altura, mezcladas con especies arbóreas secundarias como el roble, el quejigo y el haya; que es lo que cabría esperar por el tiempo que había transcurrido.

El año siguiente, 1931, los servicios centrales de la Administración le ordenan la ampliación del proyecto, incluyendo: 1) la solución para el cruce del canal de desagüe con la carretera, 2) un historial del torrente con los daños causados por las avenidas, y 3) un estudio de los pastos, con la intención de repoblar la cabecera de la cuenca del torrente al máximo compatible con la economía de los pueblos afectados. En realidad, la ampliación ocultaba una adecuación del proyecto a las disposiciones presupuestarias y a la planificación del nuevo trazado de la carretera a su paso por el cono de sedimentación del Arás. El autor respondió a las tres cuestiones planteadas y acomodó el proyecto a las circunstancias que el momento exigía: a) mantuvo la reconstrucción de los dos tramos del canal de evacuación que estaban deteriorados; b) redujo a cuatro los diques de consolidación a construir en el tramo de garganta del torrente de Arás, los imprescindibles para poder estabilizarlo, todos ellos aguas arriba de las obras ya construidas a continuación del dique de cierre y aguas abajo de la confluencia en el mismo del torrente de Betés; c) se iniciaron los trabajos de sujeción de las laderas vertientes a la garganta con enfagadas, palizadas y muretes, y, por último, d) se reforestaron las primeras hectáreas de las 500 destinadas a tal fin.

En los años siguientes, el proyecto continuó, adecuándose a las sucesivas reformas pertinentes (figs. 11 y 12), hasta que en 1964 un documento de la Jefatura Regional del Ebro del Patrimonio Forestal del Estado (PFE)



Fig. 11. Trabajos de restauración hidrológico-forestal de la garganta de la cuenca del torrente de Arás hacia 1963. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)



Fig. 12. Trabajos de estabilización del tramo de garganta del torrente de Arás. Izquierda: ejecución de fajinas para sujetar la morrera en la garganta del torrente a mediados del siglo pasado. (Fotografía de la familia Ayerbe) Derecha: imagen de 1963 que muestra una visión completa de las obras de sujeción del lecho del torrente, con diques de consolidación y fijación de sus laderas vertientes directas mediante fajinas y reforestación. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)

dio por terminados los trabajos en varios torrentes, entre ellos en el Arás; aunque años más tarde entre 1975 y 1980 el ICONA (organismo al que en 1973 le fueron transferidas las competencias del PFE) llevó a cabo reparaciones de algunas obras del torrente. En el vuelo americano de 1957 se puede distinguir que las obras de corrección se aproximaban a la confluencia de los tres torrentes (Arás, Betés y de la Selva) y que la carretera N-260 estaba en obras.

Resumen de las obras y trabajos ejecutados con los dos primeros proyectos de RH-F en el torrente de Arás y en su cuenca vertiente (1907-1964)

Se enumeran a continuación las obras y trabajos realizados entre 1907 y 1964 (NICOLÁS, 2001):

a) En el cono de sedimentación, un encauzamiento recto a lo largo de su generatriz superior (fig. 13), con el propósito de evitar que las crecidas divaguen; formado por 32 escalones de longitudes de entre 12 y 40 metros y alturas de entre 1 y 2 metros, con disipadores en cada escalón y encajonados entre dos muros laterales; salvando una longitud de 785 metros y un desnivel de 50 metros. Al vertedero final de entrega de los caudales de avenida al río Gállego se le dotó de una cota de 4,5 metros, para favorecer la afluencia de las crecidas al río. Se señala también que al inicio del encauzamiento, coincidiendo con el segundo escalón aguas abajo del gran dique de cierre, el encauzamiento disponía de un vertedero lateral para evacuar los caudales



Fig. 13. Dos vistas del canal escalonado de tramos erosionables en el cono de sedimentación del torrente de Arás. Izquierda: 1963. Derecha: 1993. (Fototeca Forestal Española, DGB-INIA, 2004)

sobrantes. Entre el inicio del encauzamiento y el gran dique de cierre, se dispusieron 10 estructuras transversales de 2 a 3,5 metros de altura, distanciadas entre 12 y 26 metros y unidas entre sí por muros longitudinales en un tramo de 170 metros, salvando un desnivel de 35 metros, que finaliza en el contradique del gran dique de cierre.

b) En el tramo de la *garganta* del torrente se distinguen tres secciones: inferior, media y superior.

b.1) En la sección inferior, inmediatamente aguas arriba del dique de cierre, se construyeron 17 obras transversales de consolidación del lecho y márgenes del torrente, entre diques de primero y segundo orden, de alturas comprendidas entre 7 y 1,5 metros y separados entre sí entre 10 y 25 metros, cubriendo una longitud de 270 metros y un desnivel de 50 metros. Los diques se conectaron entre sí por muretes longitudinales. Estas obras pertenecen al periodo cuya dirección correspondió a don Pedro de Ayerbe.

b.2) En la sección media de la garganta, aguas arriba de la anterior pero por debajo del torrente de Betés, se construyeron 18 obras transversales también de consolidación del lecho y márgenes del torrente, de las que 8 se consideran diques de primer orden, dos de segundo orden y el resto como contradiques. Sus alturas oscilan entre 2 y 9 metros, según la categoría de la obra, y estas presentan una separación mayor entre ellas, llegando hasta los 125 metros. Como en el tramo anterior, los diques se conectaron entre sí por muros longitudinales, cubriendo una longitud de 600 metros y salvando un desnivel de 110 metros.

b.3) En la sección superior del tramo de garganta, aguas arriba de la afluencia del torrente de Betés en el torrente de Arás, se construyeron dos diques, al pie de la ladera donde se ubica el pueblo de Yosa y tres diques más de altura reducida en el torrente de Aso, aguas arriba de los dos primeros, para fijar el perfil longitudinal del torrente.

c) En lo que respecta a los dos tributarios al torrente de Arás, en el de Yosa se construyeron los dos diques proyectados por Mariano Borderas y en el de Betés no se llegó a construir ninguno, a pesar de que estaba proyectado un dique de cierre. Además, se realizaron trabajos de drenaje para evitar un corrimiento de fondo detectado en la ladera derecha del torrente de Arás sobre la que se asienta el pueblo de Yosa.

d) Asimismo, se finalizó la reforestación de las 500 hectáreas proyectadas y se realizaron trabajos de sujeción de las laderas vertientes directas al torrente mediante faginas y muretes, seguidas de revegetaciones. La magnitud y la duración del proyecto exigieron la ejecución de diversas obras auxiliares, como caminos forestales, refugios y almacenes.

Resumiendo, los dos primeros proyectos de RH-F del torrente de Arás y su cuenca vertiente comprenden el periodo 1907-1964, siendo los responsables de su dirección, además de los citados don Pedro de Ayerbe y don Mariano Borderas, los ingenieros de montes don José María de Ayerbe (hijo de don Pedro) que se hizo cargo a partir de 1947, don Jaime Jordán de Urriés y don José María Ruiz Tapiador.

Las actuaciones realizadas consiguieron regular las crecidas del torrente de Arás, evitando los cortes periódicos en la carretera N-260 durante los inviernos. Al comienzo de la década de los setenta, el torrente se consideraba definitivamente corregido, algo que también sucedía en los años veinte, según se desprende de las informaciones de que se dispone de aquella época. La RH-F de la cuenca del torrente de Arás despertó interés entre los expertos en corrección de torrentes y en los años previos a la tormenta del 7 de agosto de 1996 fue visitado por varias delegaciones; la última la del Grupo de Ordenación de Cuencas de Montaña de la Comisión Forestal Europea de la FAO en julio de 1994.

Operaciones previas a la aplicación de la metodología en las cuencas vertientes a los torrentes de Arratiecho y Arás

La descripción de las operaciones se inicia con las que se refieren a las cubiertas forestales, para continuar con las que afectan a las obras ejecutadas en los cauces y en la propia cuenca, y finalizar con las sinergias surgidas entre ambas.

Operaciones para evaluar el efecto protector de las cubiertas forestales

Se ha indicado anteriormente que en relación con las cubiertas forestales la *metodología* establece tres condiciones: 1) la caracterización de su estado físico, en este caso el de las cuencas vertientes a los torrentes de

Arratiecho y Arás; 2) la asignación de los parámetros representativos de dichas cubiertas y de su medio que inciden en el control de las crecidas torrenciales, y 3) la ponderación de la incidencia de los parámetros que han sido asignados ante el riesgo que se analiza.

Caracterización del estado físico de las cubiertas forestales de las cuencas a las que se aplica la metodología

Para llevarlo a cabo FÁBREGAS y cols. (2011) realizaron las operaciones que en orden cronológico y agrupadas en cuatro fases se describen a continuación.

a) En la primera fase, utilizando la escala 1 : 5000, abordaron las siguientes tareas: a₁) la topografía, incluyendo un modelo digital del terreno (MDT); a₂) la generación de los mapas de pendientes y orientaciones; a₃) la realización de un mapa litológico a partir de la información geológica disponible en la Comunidad Autónoma de Aragón, y a₄) un trabajo con ortomágenes para el análisis de la vegetación, especialmente de las masas forestales, así como también para inventariar las obras de ingeniería para el control de los riesgos naturales y los diferentes elementos expuestos a estos últimos. Las tres tareas siguientes se realizaron mediante fotointerpretación y consistieron en a₅) una caracterización preliminar de los tipos de cubiertas forestales; a₆) un mapa de ubicación de las obras de protección contra riesgos naturales en la montaña, para establecer en una primera aproximación los objetivos que defienden, y a₇) la delimitación de las posibles zonas de peligro ante los diferentes tipos de riesgos.

b) En la segunda fase se realizó un trabajo de campo, que incluyó las tareas siguientes: b₁) la elaboración de un inventario forestal, atendiendo a los diferentes parámetros utilizados en la predefinición en gabinete de los diferentes tipos de cubiertas forestales, llevando a cabo las rectificaciones que procediesen tras su comprobación *in situ*; b₂) un análisis y evaluación de las áreas de riesgo significativas para los diferentes tipos de fenómenos adversos, diferenciando en ellas las zonas de salida, de recorrido y de anegación y depósito de los flujos y de los materiales desplazados, observando y anotando las evidencias sobre el terreno, para corroborar la existencia de un peligro dado, su ubicación e intensidad, y b₃) una recopilación cualitativa

de la constancia histórica de los eventos relacionados con los riesgos naturales analizados y de los elementos expuestos a ellos, que hubieran sido o hubieran podido ser alcanzados. Dicha constancia histórica incluyó la de tipo documental o escrita, oral y/o visual, pero la investigación se limitó a constatar la información histórica.

c) La tercera fase consistió en un trabajo de procesado de los datos de campo y la comparación con los datos previos obtenidos en gabinete, que implicó las siguientes operaciones: c_1) la corrección y/o modificación de los errores en el trabajo de caracterización de los escenarios en cuestión; c_2) el replanteo de los puntos significativos localizados en el terreno; c_3) la división de las cubiertas forestales a partir de los datos previos de la fotointerpretación, corroborados con los datos del inventario de campo tras el reconocimiento en el terreno, y c_4) la estimación de una división previa en tipologías de cubiertas protectoras, atendiendo a criterios dasocráticos.

d) En la cuarta fase se elaboraron las cartografías temáticas de los parámetros que permitían ser cartografiados y definen el estado físico de los escenarios de trabajo y, consecuentemente, contribuyen a determinar el grado de protección de esos mismos ante los riesgos naturales.

Asignación de los parámetros representativos de las cubiertas forestales y de su medio que intervienen en el control de las crecidas torrenciales

Caracterizado el estado físico actual de las cubiertas forestales de las cuencas vertientes a los torrentes de Arratiecho y Arás, para establecer sus parámetros representativos y de su medio que inciden en el control de las crecidas torrenciales, se utilizaron de referencia los criterios sintetizados en la tabla III (REY y cols., 2009), que analiza la incidencia de las cubiertas forestales en el ciclo del agua y en la estabilidad del suelo, por considerarlos estructuralmente lógicos y comprobados experimentalmente. La tabla III centra la protección de las cubiertas forestales en sus distintas tipologías o formaciones y, en lo que se refiere a la estabilidad del suelo, pone el énfasis en la reducción del efecto salpicadura, es decir, de la erosión del suelo por impacto de las gotas de lluvia. Por ello, se consideró conveniente utilizar también los *índices de protección del suelo por la vegetación* (tabla IV) de LÓPEZ CADENAS DE LLANO y BLANCO CRIADO (1968), que fundamentan la

protección del suelo por las cubiertas forestales en la contribución de estas a la reducción de la capacidad de la lámina de escorrentía para erosionar y arrastrar el suelo en una ladera; los *índices* incorporan también al análisis situaciones de suelos cultivados y dan mayor significado a la pendiente del terreno. En la selección de los parámetros a incorporar en la *metodología* se tuvo en cuenta el contenido de ambas tablas.

Además, se incorporó un factor discriminante *f* en los TUP asociados a los barrancos y torrenteras a fin de atender al efecto de la vegetación específica

Tabla III. Efectos de las cubiertas forestales en la regulación del ciclo del agua y en la defensa del suelo frente a la erosión hídrica y su repercusión en las crecidas torrenciales (REY y cols., 2009).

	<i>El papel positivo del bosque y de la vegetación</i>	<i>Consecuencias en las crecidas torrenciales y en la erosión del suelo</i>	<i>Factores a considerar en la matriz, crecidas torrenciales</i>
Sobre el ciclo del agua	Intercepción de una parte del agua de lluvia.	Disminución de la escorrentía superficial del agua.	Tipos de cubierta forestal arbolada con abundancia de todos los estratos de la vegetación en > 70% de la superficie de la cuenca.
	Retraso en la fusión del manto de nieve.		
	Aumento de la infiltración del agua en el suelo.	Disminución de la frecuencia e intensidad de las crecidas o avenidas torrenciales.	Presencia de numerosos estratos de la vegetación y diversidad de especies.
	Retorno de una parte del agua del suelo a la atmósfera por evapotranspiración.		Abundancia de formaciones arbóreas de ribera en las zonas próximas a los cursos de agua.
Sobre la estabilidad del suelo	Disminución de la energía cinética de las gotas de lluvia.	Reducción del efecto salpicadura (erosión del suelo por impacto de las gotas de lluvia).	Tipos de cubierta forestal arbolada con abundancia de todos los estratos de la vegetación en > 70% de la superficie de la cuenca.
	Moderación de los intervalos de temperatura diaria.	Reducción de la disgregación en las rocas.	
	Mejora de la cohesión del suelo y reforzamiento de sus propiedades.	Sujeción de suelos.	Presencia de numerosos estratos de la vegetación y diversidad de especies.
	Captura y retención de los sedimentos erosionados aguas arriba.	Disminución de la cantidad de sedimentos emitidos por las cuencas vertientes.	Cubierta vegetal > 30% arbustiva y herbácea en barrancos y torrenteras, incluido en sus lechos.

Tabla iv. Índices de protección del suelo por la vegetación de LÓPEZ CADENAS DE LLANO y BLANCO CRIADO (1968).

<i>Tipo de vegetación</i>	<i>Estado de la vegetación</i>	<i>Pendiente del terreno</i>	<i>Índices de protección</i>
Forestal	Masas arboladas densas (cabida cubierta $\geq 0,7$).	Cualquiera	1
	Masas arboladas de cabida cubierta $< 0,7$ con sustrato arbustivo o herbáceo no degradado.		1
	Masas arboladas de cabida cubierta $< 0,7$ con sustrato arbustivo o herbáceo degradado.	3 (*)	0,4
		2 (*)	0,8
		1 (*)	1
	Vegetación arbustiva no degradada.	Cualquiera	1
	Vegetación arbustiva degradada.	3	0,2
		2	0,6
		1	0,8
	Pastizales bien conservados.	$< 30 \%$	0,9
		$> 30 \%$	0,6
	Pastizales degradados.	Cualquiera	0,3
Agrícola	Cultivos agrícolas sin prácticas de conservación de suelos.	3	0
		2	0,5
		1	0,9
	Cultivos agrícolas con prácticas de conservación de suelos.	3	0,3
		2 y 1	1
No productivo	Terrenos desnudos.	3	0
		2	0,5
		1	0,9

(*) 1) Pendiente inferior al de *iniciación de la erosión* ($< 12\%$); 2) pendiente comprendida entre la *iniciación de la erosión* y el *arrastre total* ($12\% < p < 24\%$), y 3) pendiente superior a la de *arrastre total* ($> 24\%$).

en los mismos; para este factor se adoptaron los valores siguientes: a) vegetación de ribera abundante: $f = 1,0$; b) vegetación de ribera suficiente: $f = 0,7$; c) vegetación de ribera insuficiente: $f = 0,3$. Por supuesto, esta vegetación en ningún momento debe suponer un obstáculo para la descarga de las crecidas torrenciales, sino una protección para sus márgenes y lechos.

El resultado se muestra en la tabla v, con cuyo contenido se preconfiguran los TUP atendiendo a los parámetros que intervienen y en la proporción que lo hacen. Para la configuración definitiva posterior, se requiere

Tabla v. Parámetros de las cubiertas forestales y del medio en el que se ubican seleccionados en la *metodología* por su incidencia en el riesgo de las crecidas torrenciales y sus correspondientes porcentajes de intervención.

<i>Factores</i>	<i>Porcentaje</i>
1) Tipo de cubierta vegetal	10
2) Fracción de cabida cubierta: FCC (%)	25
3) Densidad (número pies/ha)	10
8) Heterogeneidad de la formación o masa forestal	15
9) Formación (irregularidad de la masa forestal)	15
11) Tipo de suelo	10
12) Pendiente media del terreno (%)	15
Conjunto de todos los factores	100

considerar la intensidad con la que intervienen los parámetros, dependiendo del grado de su desarrollo.

Ponderación de la intensidad con la que inciden los parámetros asignados ante el riesgo de crecidas torrenciales

Para esta operación se elaboraron previamente los mapas temáticos correspondientes a los parámetros asignados en el apartado anterior para ambas cuencas de Arratiecho y Arás. A continuación se realizó una ponderación inicial de las clases definidas en dichos mapas siguiendo el baremo de 1 a 5 (tabla vi). Por último, se determinó un índice de ponderación medio para cada uno de los TUP preconfigurados en la operación anterior. El producto de estos últimos por sus índices de ponderación medios proporcionaron los valores de los TUP definitivos.

Operaciones para evaluar el efecto protector de las obras hidráulicas de corrección ejecutadas en los cauces y en las laderas que vierten directas a los torrentes

Para analizar la protección aportada por las obras de corrección hidráulica tanto en la cuenca del torrente de Arratiecho como en la del de Arás, se analizaron todas las precipitaciones en 24 horas registradas en las estaciones meteorológicas: Biescas E I A (código 9454; periodo operativo 1927-1980)

Tabla vi. Índices de ponderación de los parámetros seleccionados como representativos de las cubiertas forestales y de su medio ante el riesgo de crecidas torrenciales, atendiendo a su grado de desarrollo, magnitudes u otras circunstancias específicas de los mismos.

Parámetros representativos							
Tipo de cubierta vegetal	Fracción de cubierta cubierta (%)	Densidad (número pies/ha)	Heterogeneidad de la masa forestal	Formación de la masa forestal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno (%)	Índice de ponderación
Terreno desnudo.	< 15	< 250	Masa monoespecífica.	Masa coetánea.	Roca-litosuelo.	< 70	1
a) Prado b) Pastizal abierto (< 50% cobertura) c) Pastizal denso (> 50% cobertura)	15-29	250-499	Masa monoespecífica con especies acompañantes y abundante matorral.	Masa con dos clases de edad.	Suelo superficial.	35-70	2
a) Pastizal / Matorral abierto (< 50% matorral) b) Matorral bajo (> 50% matorral; h < 1 m) c) Bosque muy abierto (FCC < 15%)	30-49	500-999	Masa con dos especies principales (coníferas).	Masa con tres clases de edad.	Suelo poco desarrollado.	34-12	3
a) Matorral alto (> 50% matorral; h > 1 m) b) Bosque abierto (15 < FCC < 30%) c) Bosque (30 < FCC < 70%)	50-70	1000-1500	Masa con dos especies principales (conífera + frondosa).	Masa irregular en bosquetes.	Suelo medio de ladera.	< 12	4
Bosque denso (FCC > 70%)	> 70	> 1500	Masa muy heterogénea.	Masa irregular.	Suelo profundo.	< 12	5

y Biescas Central II (código 9454 A; periodo operativo 1971-2012), por ser las más próximas a ambas cuencas y con el periodo de registro de datos más prolongado. De todos estos valores, en los gráficos superiores de las figuras 14, 15 y 16 se representan las precipitaciones máximas en 24 horas de cada año: $P_{\text{máx. 24 horas de cada año}}$ (mm) con rombos azules; pero se operó con todos los valores. En las figuras mencionadas, aparece un tramo (acotado por dos líneas perpendiculares al eje de las abscisas) que corresponde al periodo 1971-1980, en el que se solapan las precipitaciones registradas en las dos estaciones. Las precipitaciones que aparecen en dicho tramo son la media de las registradas en cada una de las estaciones, que cabe indicar que son valores muy próximos.

A continuación, utilizando el método del número de curva (NC), se estimaron las escorrentías directas asociadas a todas las precipitaciones diarias. Se planteó un procedimiento sistemático de cálculo de las escorrentías para todas las precipitaciones diarias utilizando los números de curva (NC = 95, NC = 80 y NC = 60); seleccionándose a continuación los mayores valores de cada año: $Q_{\text{máx. de cada año}}$ (mm) asociados con las $P_{\text{máx. 24 horas de cada año}}$ (mm). En el gráfico superior de las figuras 14, 15 y 16 se muestran con triángulos verdes.

A posteriori se determinaron los caudales punta específicos q_{ps} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) asociados a las escorrentías definidas en el párrafo anterior $Q_{\text{máx. de cada año}}$ (mm), representados por cuadrados marrones en las figuras 14, 15 y 16.

Los valores de q_{ps} que aparecen en las figuras mencionadas se han obtenido dividiendo los caudales punta q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) determinados para la cuenca del torrente de Arratiecho por la superficie de esta. Se podrían haber obtenido a partir de los caudales punta de la cuenca del torrente de Arás y, en este caso, los valores de q_{ps} diferirían ligeramente, porque en el cálculo de los caudales punta interviene el tiempo de concentración y cada cuenca tiene el suyo; pero para el análisis planteado en la práctica las diferencias son poco significativas.

En los gráficos inferiores de las figuras 14, 15 y 16 se muestra en azul la *curva de precipitaciones diarias clasificada* correspondiente al registro histórico 1927-2012, así como el rango de escorrentías correspondientes a las precipitaciones (que se señala en marrón) en función de a) del NC (NC = 95, en la figura 14; NC = 80, en la figura 15, y NC = 60 en la figura 16) y b) el estado de humedad del suelo en el momento de la precipitación, aplicando al respecto las condiciones I, II y III que establece el procedimiento del NC.

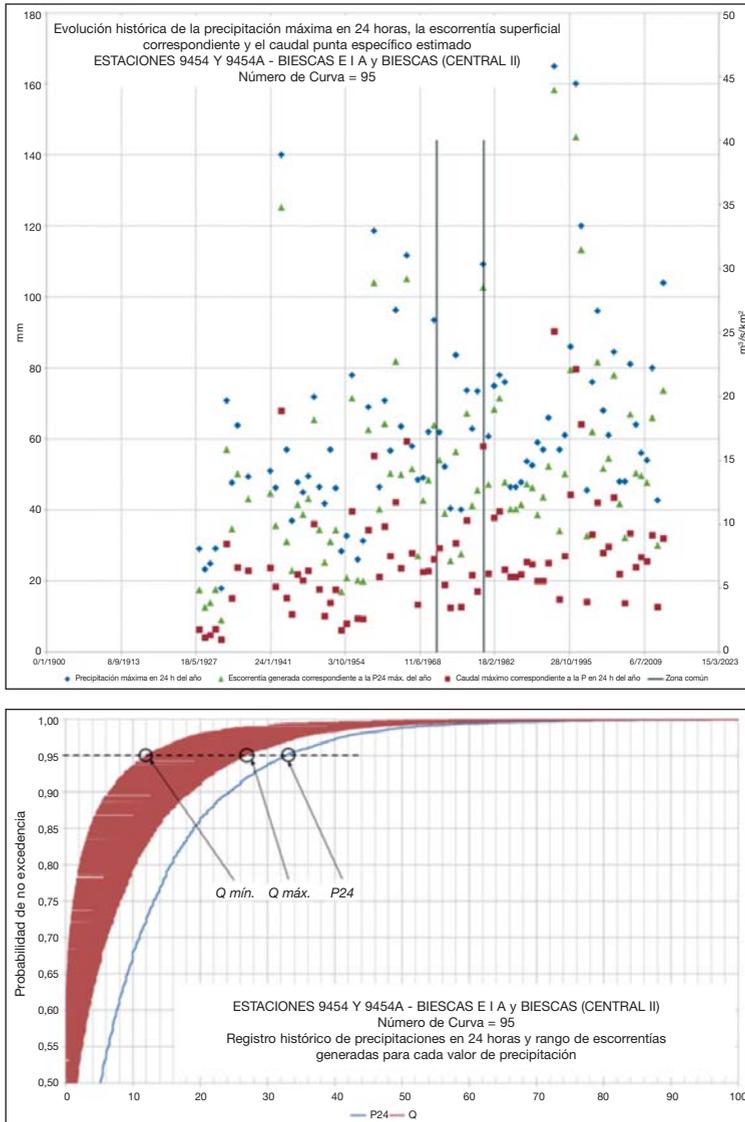


Fig. 14. Gráfico superior: precipitaciones máximas anuales (rombos); escorrentías directas máximas anuales (triángulos) con NC = 95; caudales máximos específicos anuales (cuadrados), para los datos registrados en las estaciones de Biescas E I A (código 9454) y Biescas Central II (código 9454A) en el periodo 1927-2012 y $t_c = 0,81$ horas (que corresponde a la cuenca del torrente de Arratiecho). Gráfico inferior: registro histórico de la precipitación en 24 horas (*curva de precipitaciones diarias clasificada*) y rangos de escorrentías generadas para cada valor de precipitación, dependiendo del NC y de las condiciones de humedad del suelo en cada momento.

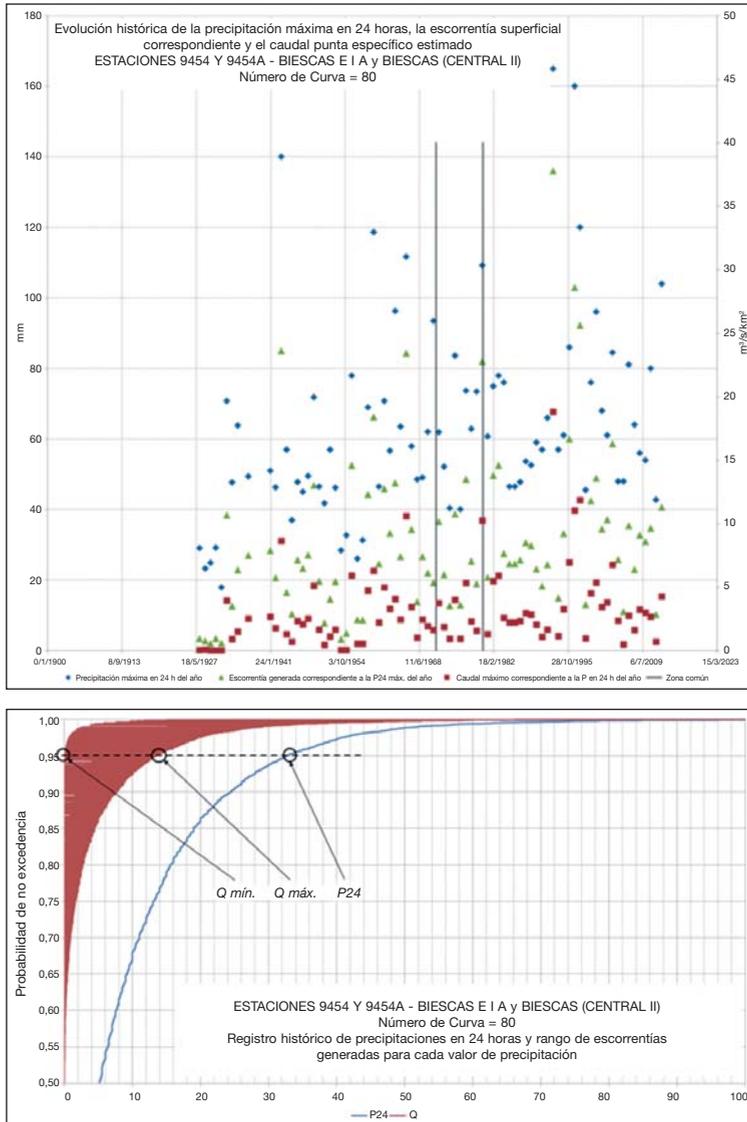


Fig. 15. Gráfico superior: precipitaciones máximas anuales (rombos); escorrentías directas máximas anuales (triángulos) con $NC = 80$; caudales máximos específicos anuales (cuadrados), para los datos registrados en las estaciones de Biescas E I A (código 9454) y Biescas Central II (código 9454A) en el periodo 1927-2012 y $t_c = 0,81$ horas (que corresponde a la cuenca del torrente de Arratiecho). Gráfico inferior: registro histórico de la precipitación en 24 horas (*curva de precipitaciones diarias clasificada*) y rangos de escorrentías generadas para cada valor de precipitación, dependiendo del NC y de las condiciones de humedad del suelo en cada momento.

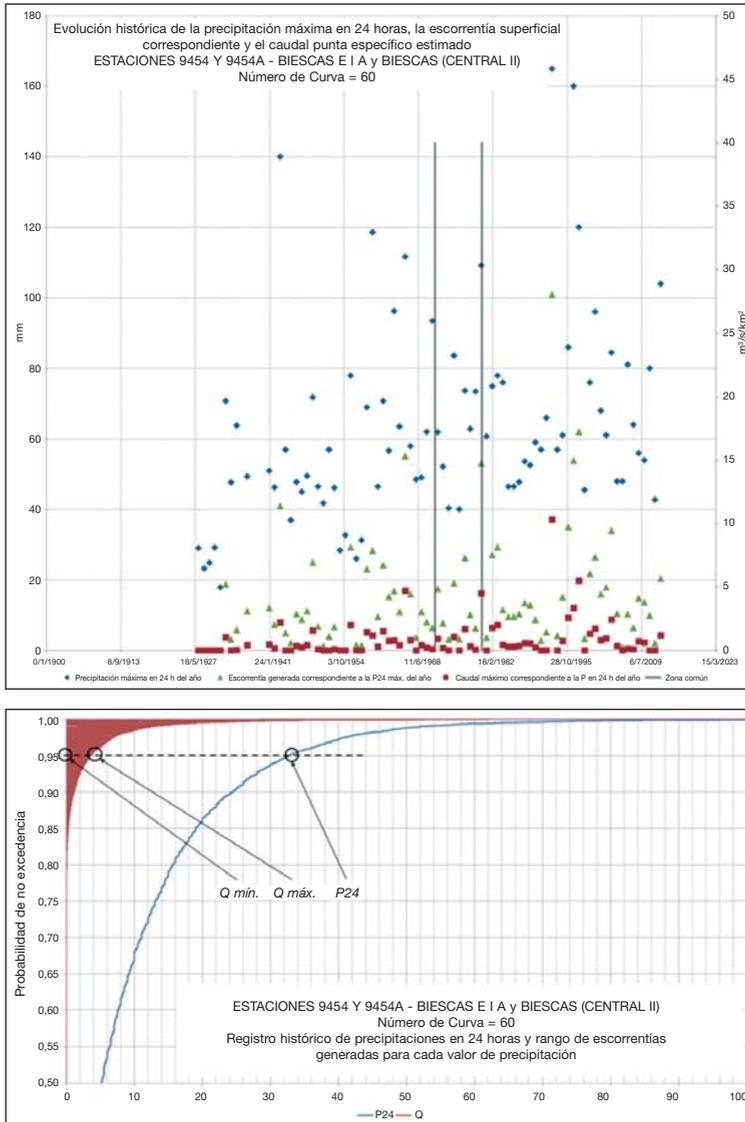


Fig. 16. Gráfico superior: precipitaciones máximas anuales (rombos); escorrentías directas máximas anuales (triángulos) con NC = 60; caudales máximos específicos anuales (cuadrados), para los datos registrados en las estaciones de Biescas E I A (código 9454) y Biescas Central II (código 9454A) en el periodo 1927-2012 y $t_c = 0,81$ horas (que corresponde a la cuenca del torrente de Arratiecho). Gráfico inferior: registro histórico de la precipitación en 24 horas (*curva de precipitaciones diarias clasificada*) y rangos de escorrentías generadas para cada valor de precipitación, dependiendo del NC y de las condiciones de humedad del suelo en cada momento.

Para el cálculo previo de los caudales punta de avenida q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) se utilizó la *fórmula racional* modificada por TÉMEZ (1978), que establece la ecuación siguiente:

$$q_p = 1,2 \frac{C \cdot I_t \cdot A}{3,6}$$

Siendo:

q_p , el caudal punta ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

C , el coeficiente de escorrentía, que el autor define por la ecuación:

$$C = \frac{(P_{24} - P_0) - (P_{24} + 23P_0)}{(P_{24} + 11P_0)^2}$$

Los términos que aparecen en esta última ecuación representan:

P_{24} , la precipitación máxima en 24 horas (mm)

$P_0' = k \cdot P_0$ para $k = 2,5$ (coeficiente regional para el Pirineo)

$$S = \frac{25400}{NC} - 254$$

I_t , la intensidad de la lluvia en el tiempo de concentración t_c . Témez establece la fórmula siguiente para su obtención:

$$t_c = 0,3 \left[\frac{L}{j^{0,25}} \right]^{0,76}$$

Siendo:

L , la longitud del torrente en kilómetros;

j , su pendiente en $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$

A , la superficie de la cuenca (km^2)

La adopción de estas ecuaciones para el cálculo de los caudales de crecida se justifica: a) porque son las que se han utilizado de un modo habitual en las obras de los diferentes servicios de la Administración española en las últimas décadas, por tanto, asumiendo el coeficiente de seguridad propio en ingeniería, se tiene una experiencia contrastada de su adecuación a los fenómenos reales, y b) porque la investigación que se comenta tiene un carácter marcadamente finalista, se centra en valores medios y abarca el periodo más largo posible; por tanto, su precisión hay que adecuarla al rango de certidumbre de los datos que se manejan y sin perder de vista los

objetivos planteados. Evidentemente, la creación de una red de mediciones en ambos torrentes sería lo deseable para aforar las futuras crecidas, pero es fundamental que dicha red se pueda perpetuar en el tiempo.

En el apartado de “Resultados” se completa la información anterior aportando los caudales punta estimados q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) en las secciones de salida de las cuencas de los torrentes de Arratiecho y de Arás, para las situaciones hidrológicas de ambas cuencas que se consideran más probables en los momentos en que tuvieron lugar las precipitaciones utilizadas en las simulaciones, es decir, utilizando los NC más ajustados en cada caso (tabla IX).

RESULTADOS

Resultados alcanzados con la metodología relacionados con protección de las cubiertas forestales

Se inicia este apartado con la exposición de unas imágenes del estado físico de las cuencas de los torrentes de Arratiecho (figs. 17a, b y c) y de Arás (figs. 18a y b) del año 2011 y posteriores. También se adjuntan los mapas de las cubiertas forestales de ambas cuencas en el año 2011; del torrente de Arratiecho (fig. 19) y de la del torrente de Arás (fig. 20).

Cuenca del torrente de Arratiecho

La aplicación de la *metodología* para evaluar el riesgo ante las crecidas torrenciales a la cuenca del torrente de Arratiecho proporcionó 22 TUP (fig. 21); que en la tabla VII se muestran agrupados en cada una de las cuatro clases de tipos de montes protectores (TMP), cuya distribución espacial se muestra en la figura 22.

Tabla VII. Distribución de los 22 TUP de la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en las cuatro clases de TPM.

<i>Capacidad de protección ante las crecidas torrenciales</i>	<i>Número de TUP</i>
Muy buena $TMP > 350$	11
Buena ($250 < TMP < 350$)	5
Regular ($150 < TMP < 250$)	2
Deficiente < 150	4

TUP: tipo de unidad protectora; TMP: tipo de monte protector.



Fig. 17a. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en marzo de 2012.
 Imágenes superiores: vistas generales de la cuenca. Imágenes centrales: estado actual de los trabajos de estabilización de la ladera noreste ejecutados a comienzos del siglo xx.
 Imágenes inferiores: estado actual del encauzamiento del torrente, ejecutado también a comienzos del siglo xx, en el primer tramo de la garganta de la cuenca.

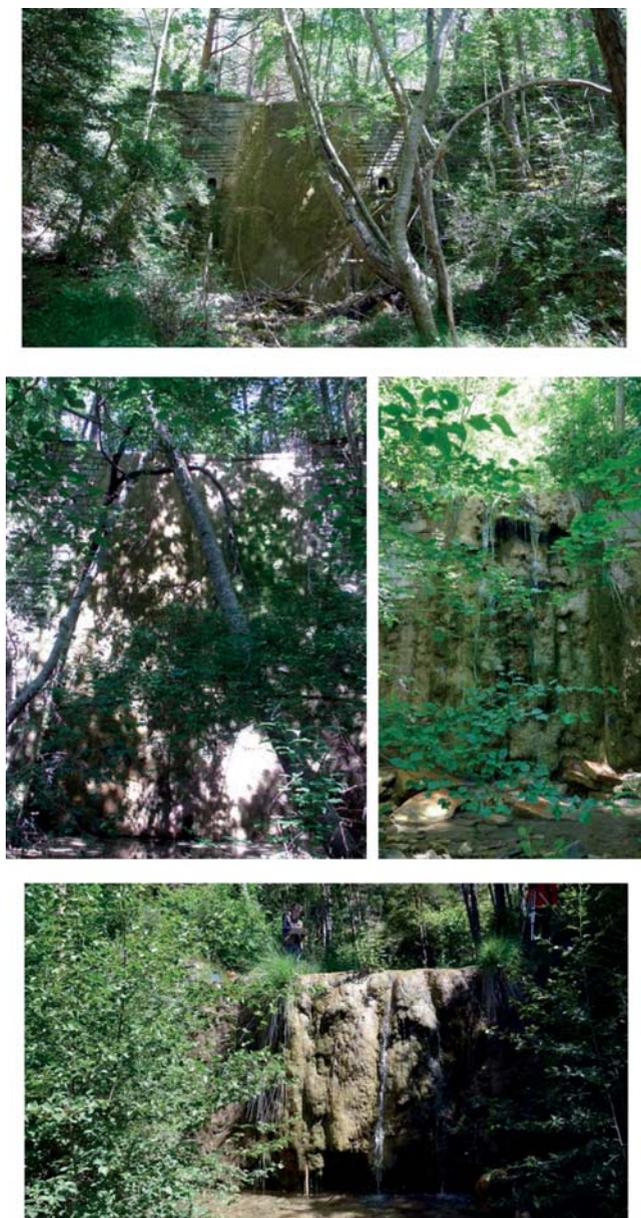


Fig. 17b. Cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en julio de 2016. Estado actual de los cuatro diques de primer orden situados en el encauzamiento del torrente en la garganta de la cuenca. La ubicación de los mismos va del inicio de la garganta (imagen superior) hacia aguas abajo; sus alturas son $H = 6$ metros (imagen superior), $H = 10$ metros y $H = 6$ metros (imágenes centrales izquierda y derecha) y $H = 4$ metros (imagen inferior).



Fig. 17c. Cono de sedimentación de la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en marzo de 2012. Imágenes superiores: vistas del inicio del cono de sedimentación del torrente fotografiadas desde la carretera N-260; izquierda, aguas arriba; derecha, aguas abajo.

Estas vistas se corresponden con las de la figura 7 obtenidas cien años antes.

Imágenes inferiores: izquierda, la carretera N-260 en la sección que atraviesa al torrente de Arratiecho en su estado actual, en el que el antiguo badén ha sido sustituido por dos tubos de 7 metros de longitud y 600 milímetros de diámetro y la carretera se ha elevado 0,5 metros sobre la rasante original; derecha, otra vista del canal escalonado que atraviesa el cono de sedimentación del torrente, al fondo el paso por el mismo de la carretera N-260.



Fig. 18a. Cuenca vertiente al torrente de Arás. Imágenes superiores: estado en el año 2011 de los montes protectores conseguidos en su área de recepción, con las reforestaciones de los dos primeros proyectos de RH-F ejecutados en la primera mitad del siglo XX; izquierda: cabecera del barranco de Betés (tributario al Arás); derecha, cabecera del torrente de Arás. Imágenes centrales: izquierda, bosque situado aguas arriba del núcleo de población de Aso de Sobremonte; derecha, bosque situado aguas arriba del núcleo de población de Yesa de Sobremonte. Imágenes inferiores: inicio de la garganta del torrente de Arás en octubre de 2015; izquierda, dique de hormigón revestido de mampostería ubicado en el torrente, construido a finales del siglo pasado durante el tercer proyecto de RH-F de la cuenca; derecha, el torrente aguas abajo del dique anterior. Se observa la estabilidad de sus laderas cubiertas de vegetación leñosa.

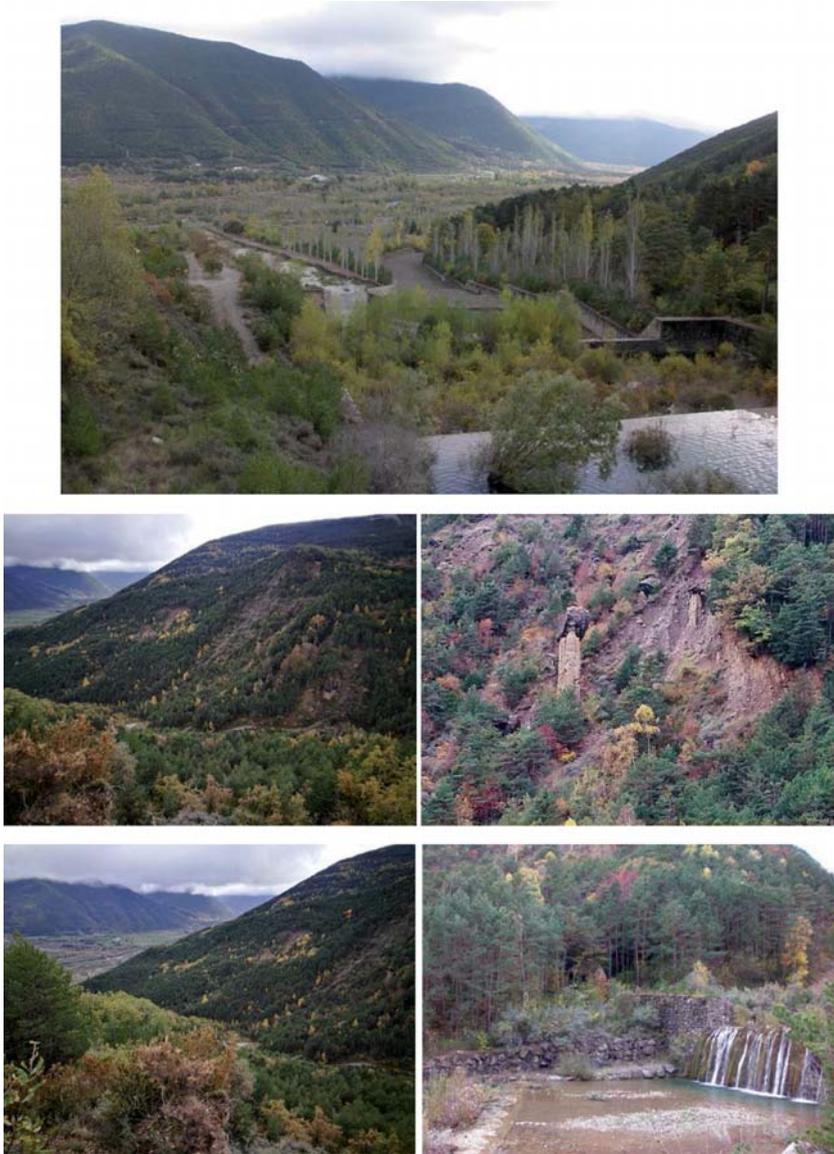


Fig. 18b. Cuenca vertiente al torrente de Arás. Imagen superior: repartidor de los caudales de crecida del torrente de Arás construido al final de la garganta con el tercer proyecto de RH-F de esta cuenca (1996-2000) en julio de 2016. Imágenes centrales e inferiores: vegetación leñosa arbolada y de matorral cubriendo las laderas directamente vertientes al torrente de Arás en su tramo de garganta en noviembre de 2016. Se detecta el efecto de los trabajos de sujeción de las laderas con vegetación leñosa comparando estas imágenes con las de las figuras 11 y 12.

Cuenca del torrente de Arás

La aplicación de la *metodología* a la cuenca del torrente de Arás para evaluar el riesgo ante las crecidas torrenciales proporcionó 50 TUP (fig. 23), que en la tabla VIII se agrupan en cada una de las cuatro clases de TMP, cuya distribución espacial se muestra en la figura 24.

Tabla VIII. Distribución de los 50 TUP de la cuenca vertiente al torrente de Arás en las cuatro clases de TPM.

Capacidad de protección ante las crecidas torrenciales	Número de TUP
Muy buena TMP > 350	21
Buena (250 < TMP < 350)	20
Regular (150 < TMP < 250)	6
Deficiente < 150	3

TUP: tipo de unidad protectora; TMP: tipo de monte protector.

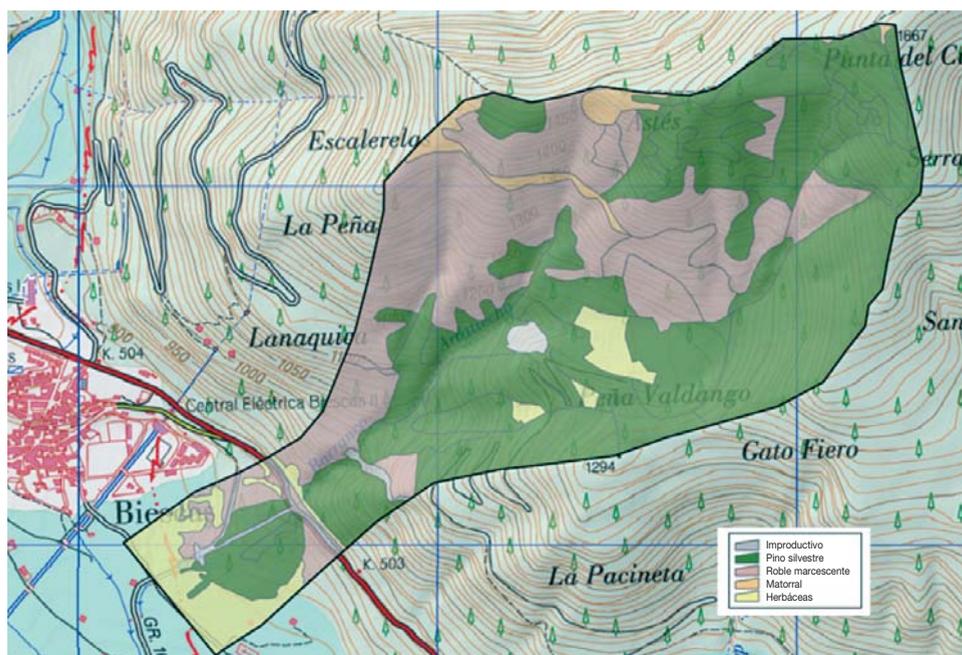


Fig. 19. Mapa de las cubiertas vegetales de la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho en el año 2011. Leyenda de arriba abajo: 1) improductivo, 2) pino silvestre, 3) roble marcescente, 4) matorral, 5) herbáceas.

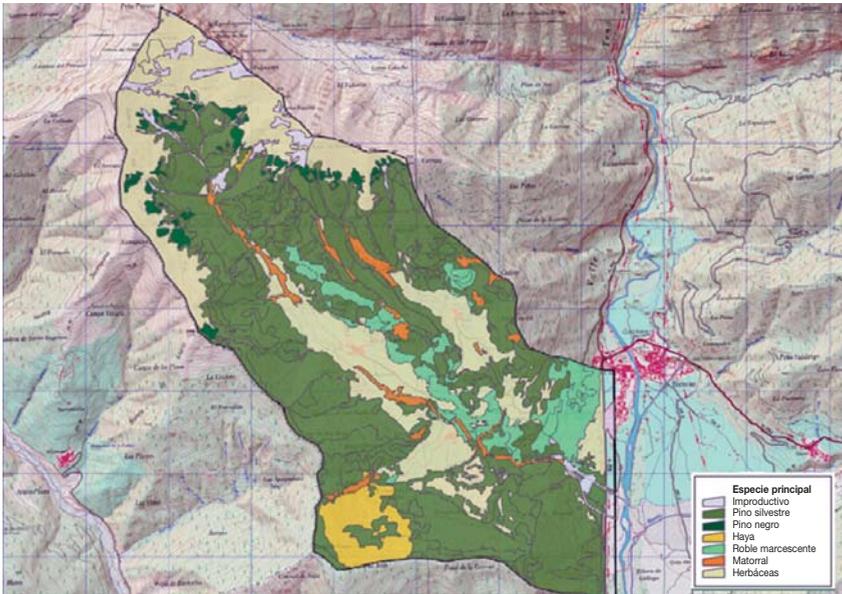


Fig. 20. Mapa de las cubiertas vegetales de la cuenca vertiente al torrente de Arás en el año 2011. Leyenda de arriba abajo: 1) improductivo, 2) pino silvestre, 3) pino negro, 4) haya, 5) roble marcescente, 6) matorral, 7) herbáceas.

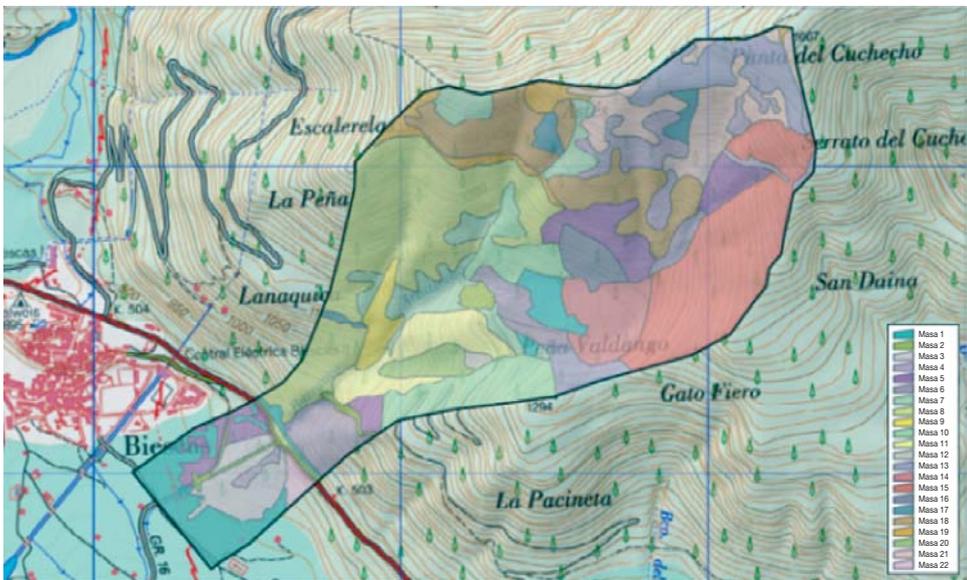


Fig. 21. Tipos de unidades protectoras (TUP) en la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho definidos con la metodología de montes protectores.

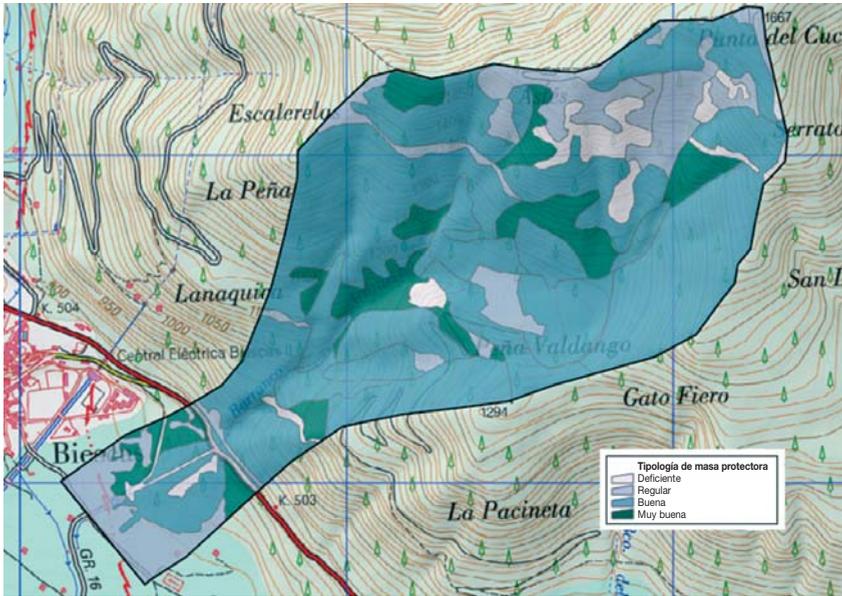


Fig. 22. Nivel de protección ante el riesgo de crecidas o avenidas torrenciales por clases de tipos de montes protectores (TMP) en la cuenca vertiente al torrente de Arratiecho. Leyenda de arriba abajo: 1) deficiente, 2) regular, 3) buena y 4) muy buena.

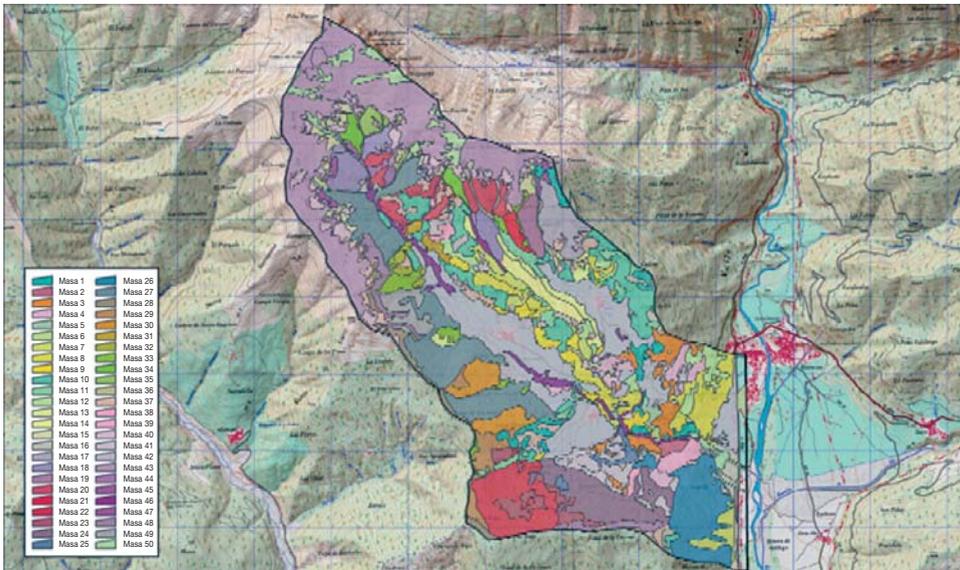


Fig. 23. Tipos de unidades protectoras (TUP) en la cuenca vertiente al torrente de Arás definidos con la metodología de montes protectores.

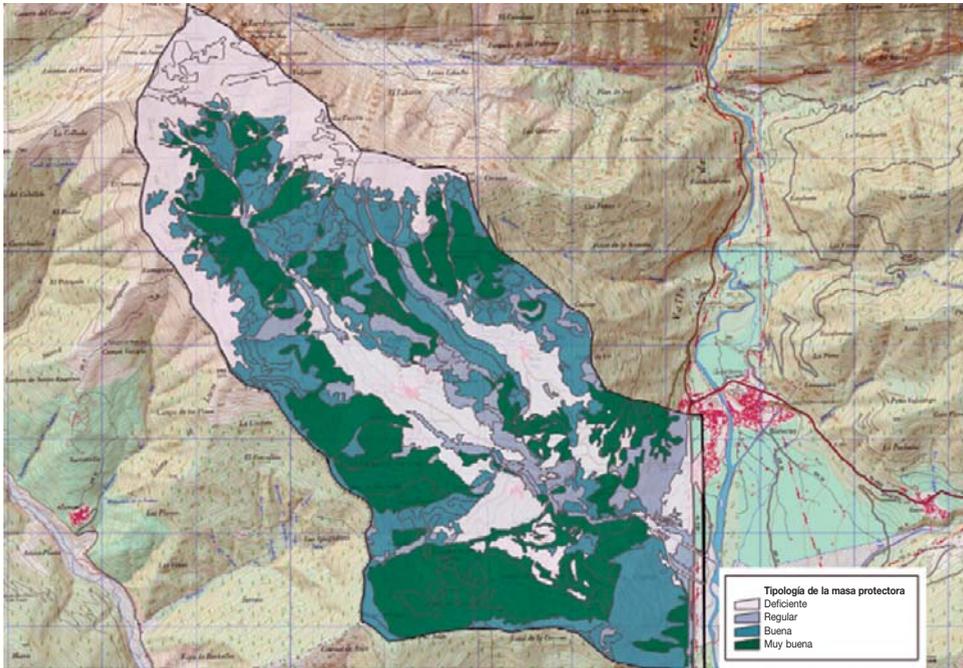


Fig. 24. Nivel de protección ante el riesgo de crecidas o avenidas torrenciales por clases de tipos de montes protectores (TMP) en la cuenca vertiente al torrente de Arás.

Legenda de arriba abajo: 1) deficiente, 2) regular, 3) buena y 4) muy buena.

Resultados alcanzados con la metodología relacionados con las obras hidráulicas de corrección de cauces torrenciales

En los proyectos de RH-F las obras hidráulicas de corrección de torrentes y de sistematización de laderas se deben ejecutar simultáneamente con las reforestaciones de sus cuencas vertientes, asumiendo que estas últimas son actuaciones necesarias para el correcto funcionamiento de las obras y para la prolongación de su vida útil. Ello justifica que en la evaluación de sus resultados se tenga en cuenta la evolución temporal de las masas arboladas surgidas de las reforestaciones. Se comenta a continuación la evolución experimentada por las cubiertas forestales de las cuencas de los torrentes de Arratiecho y de Arás desde que finalizaron sus proyectos de RH-F.

Con anterioridad a la reforestación de la cuenca del torrente de Arratiecho entre los años 1903-1907, el valor medio del NC de su cubierta vegetal debía encontrarse muy próximo a $N = 95$; pero conforme las reforestaciones se fueron asentando en la cuenca, este valor se fue reduciendo. En 1927, primer año del que se dispone de registro de precipitaciones en la estación de Biescas, la reforestación tenía veintidós años, por lo que es muy previsible que hubiera alcanzado e incluso superado el estado de monte bravo y la cubierta de la cuenca presentara un $NC = 80$. Por motivos similares a partir de 1965, tras cumplir la reforestación sesenta años y encontrarse consolidada, habiendo mejorado también el porte de las masas de *Quercus faginea* existentes en la cuenca y encontrándose esta cubierta prácticamente en su totalidad por una masa arbolada, resulta asumible asignarle un $NC = 60$ e incluso inferior.

Las primeras reforestaciones en la cuenca del torrente de Arás son posteriores a las de la cuenca del torrente de Arratiecho, su primer proyecto de RH-F concluye hacia 1912 y no incidió demasiado en las reforestaciones. Por otro lado, su masa forestal, a diferencia de lo que sucede en la cuenca del torrente de Arratiecho, nunca ha llegado a cubrir la totalidad de la cuenca; NICOLÁS (2001) le asigna un 42% de arbolado y un 14% de matorral con arbolado. Atendiendo a estos datos y optando por el lado de la seguridad, se asigna a la cubierta vegetal de esta cuenca en los veinte años siguientes a sus primeras repoblaciones un valor de $NC = 95$. Por lo señalado en la redacción de su segundo proyecto de RH-F (1930), las repoblaciones del proyecto anterior se estaban asentando y las masas de frondosas que alternaban con ellas habían mejorado su desarrollo; por lo que es probable y asumible que a partir de 1933 la cubierta vegetal en la cuenca se aproximara a $NC = 80$. Actualmente, se le puede asignar un valor del NC más reducido; pero en el análisis posterior, continuando con los criterios de seguridad establecidos, se mantiene el valor del $NC = 80$.

Asumiendo todo lo anteriormente expuesto, se ha elaborado la tabla IX, que para poder comentarla con mayor comodidad se sintetiza en la tabla X. La comprobación del contenido de ambas tablas se realiza en el apartado "Análisis de los resultados".

Tabla ix. Precipitaciones anuales máximas en 24 horas (P_{24} mm) en las estaciones meteorológicas de Biescas E I A y Biescas Central II (códigos 9454 y 9454A) en el periodo 1927-2012. Escorrentías directas máximas anuales (Q , mm) aplicando el NC de la tabla en cada año. Caudales punta anuales en las secciones de salida de las cuencas de Arratiecho y Arás (q_p , $m^3 \cdot s^{-1}$).

Año	P_{24} (mm)	NC	Q (mm)	q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) Arratiecho	P_{24} (mm)	NC	Q (mm)	q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) Arás
1927	29,0	80	3,3	0,04	29,0	95	17,5	19,80
1928	23,3	80	2,7	0,08	23,3	95	12,5	12,87
1929	24,8	80	1,9	0,00	24,8	95	13,8	14,60
1930	29,1	80	3,4	0,00	29,1	95	17,5	19,93
1931	17,9	80	2,0	0,01	17,9	95	8,9	10,60
1932	70,8	80	38,3	6,30	70,8	95	57,0	94,84
1933	47,6	80	12,5	1,44	47,6	80	12,5	10,11
1934	63,8	80	22,8	2,39	63,8	80	22,8	16,75
1935								
1936	49,4	80	26,9	4,00	49,4	80	26,9	28,04
1937								
1938								
1939								
1940	51,0	80	28,3	4,26	51,0	80	28,3	29,91
1941	46,3	80	20,6	2,81	46,3	80	20,6	19,74
1942	140,0	80	84,9	13,82	140,0	80	84,9	96,99
1943	57,0	80	16,4	2,07	57,0	80	16,4	14,55
1944	36,9	80	10,3	1,10	36,9	80	10,3	7,69
1945	47,8	80	25,6	3,74	47,8	80	25,6	26,22
1946	45,0	80	23,2	3,30	45,0	80	23,2	23,12
1947	49,5	80	27,0	4,01	49,5	80	27,0	28,16
1948	71,8	80	46,8	8,13	71,8	80	46,8	57,05
1949	46,5	80	19,6	2,64	46,5	80	19,6	18,52
1950	41,8	80	7,7	0,72	41,8	80	7,7	5,07
1951	57,0	80	14,5	1,75	57,0	80	14,5	12,30
1952	46,2	80	19,5	2,62	46,2	80	19,5	18,42
1953	28,4	80	3,1	0,07	28,4	80	3,1	0,51
1954	32,7	80	4,8	0,04	32,7	80	4,8	0,29

Tabla ix. (Continuación)

Año	P_{24} (mm)	NC	Q (mm)	q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) Arratiecho	P_{24} (mm)	NC	Q (mm)	q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) Arás
1955	78,0	80	52,5	9,41	78,0	80	52,5	65,99
1956	26,0	80	8,7	0,86	26,0	80	8,7	6,06
1957	31,3	80	8,6	0,84	31,3	80	8,6	5,93
1958	69,0	80	44,2	7,57	69,0	80	44,2	53,13
1959	118,6	80	66,2	10,02	118,6	80	66,2	70,32
1960	46,5	80	24,5	3,53	46,5	80	24,5	24,76
1961	70,8	80	45,9	7,93	70,8	80	45,9	55,64
1962	56,6	80	33,2	5,23	56,6	80	33,2	36,71
1963	96,2	80	47,4	6,48	96,2	80	47,4	45,46
1964	63,5	80	26,6	3,93	63,5	80	26,6	27,58
1965	111,7	60	55,1	7,54	111,7	80	84,3	118,95
1966	57,9	60	16,0	1,29	57,9	80	34,3	38,35
1967	48,5	60	3,6	0,00	48,5	80	13,7	11,44
1968	49,0	60	10,9	0,65	49,0	80	26,6	27,58
1969	62,0	60	8,1	0,32	62,0	80	22,0	21,51
1970	93,5	60	6,5	0,14	93,5	80	19,1	17,92
1971	61,9	60	17,5	1,50	61,9	80	36,6	41,62
1972	52,2	60	7,7	0,28	52,2	80	21,4	20,72
1973	40,4	60	3,1	0,00	40,4	80	12,7	10,27
1974	83,7	60	19,0	1,71	83,7	80	38,7	44,78
1975	40,1	60	3,2	0,00	40,1	80	12,9	10,47
1976	73,7	60	26,2	2,74	73,7	80	48,5	59,69
1977	62,9	60	10,0	0,55	62,9	80	25,2	25,77
1978	73,5	60	6,3	0,13	73,5	80	18,9	17,57
1979	109,3	60	53,1	7,18	109,3	80	81,9	114,91
1980	60,7	60	3,7	0,00	60,7	80	20,7	14,56
1981	74,9	60	27,1	2,87	74,9	80	49,6	61,48
1982	78,0	60	29,2	3,20	78,0	80	52,5	65,99
1983	76,0	60	11,4	0,72	76,0	80	27,4	28,74
1984	46,5	60	9,6	0,50	46,5	80	24,5	24,76
1985	46,5	60	9,6	0,50	46,5	80	24,5	24,76

Tabla IX. (Continuación)

Año	P_{24} (mm)	NC	Q (mm)	q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) Arratiecho	P_{24} (mm)	NC	Q (mm)	q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) Arás
1986	47,8	60	10,3	0,58	47,8	80	25,6	26,22
1987	53,6	60	13,4	0,97	53,6	80	30,5	33,01
1988	52,6	60	12,9	0,90	52,6	80	29,7	31,81
1989	59,0	60	8,7	0,40	59,0	80	23,1	22,90
1990	57,0	60	2,8	0,00	57,0	80	18,2	12,09
1991	66,0	60	5,1	0,00	66,0	80	24,3	18,38
1992	165,0	60	100,9	16,53	165,0	80	135,9	211,07
1993	57,0	60	4,2	0,00	57,0	80	14,8	12,74
1994	61,0	60	15,1	1,18	61,0	80	33,1	36,59
1995	86,0	60	35,1	4,11	86,0	80	59,9	77,96
1996	160,0	60	53,8	5,35	160,0	80	102,9	124,00
1997	120,0	60	62,0	8,79	120,0	80	92,2	132,81
1998	45,5	60	3,3	0,00	45,5	80	13,0	10,60
1999	76,0	60	21,7	2,08	76,0	80	42,4	50,37
2000	96,0	60	26,4	2,77	96,0	80	48,8	60,19
2001	68,0	60	16,0	1,30	68,0	80	34,4	38,48
2002	61,0	60	17,9	1,55	61,0	80	37,0	42,34
2003	84,5	60	34,0	3,93	84,5	80	58,5	75,68
2004	48,0	60	10,4	0,59	48,0	80	25,7	26,44
2005	48,0	60	0,8	0,00	48,0	80	10,9	5,24
2006	81,0	60	10,3	0,19	81,0	80	35,4	30,78
2007	64,0	60	6,5	0,14	64,0	80	22,9	17,92
2008	56,0	60	14,8	1,15	56,0	80	32,6	35,96
2009	54,0	60	13,7	1,00	54,0	80	30,9	33,50
2010	80,0	60	9,9	0,00	80,0	80	34,6	29,88
2011	42,7	60	2,1	0,00	42,7	80	10,2	7,62
2012	104,0	60	20,4	1,90	104,0	80	40,6	47,65
Máximo	165,0		100,9	16,53	165,0		135,9	211,07
Promedio	63,5		20,7	2,54	63,5		32,8	37,42

Tabla x. Valores absolutos y promedios de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas (P_{24} mm) en las estaciones meteorológicas de Biescas E I A y Biescas Central II (códigos 9454 y 9454A) y caudales punta absolutos y promedios en las secciones de salida de las cuencas de Arratiecho y de Arás (q_p , $m^3 \cdot s^{-1}$) en los periodos 1927-1932, 1933-1964 y 1965-2012.

Precipitaciones			Caudales			
Estaciones E-9454 y E-9454 A			Cuenca de Arratiecho		Cuenca de Arás	
Periodo	P_{24} absoluta (mm)	P_{24} media (mm)	q_p *absoluto ($m^3 \cdot s^{-1}$)	q_p *medio ($m^3 \cdot s^{-1}$)	q_p *absoluto ($m^3 \cdot s^{-1}$)	q_p *medio ($m^3 \cdot s^{-1}$)
1927-1932	70,8 (1932)	32,5	6,30	1,07	94,84	28,77
1933-1964	140,0 (1942)	57,7	13,82	4,10	96,99	28,75
1965-2012	165,0 (1992)	70,8	16,53	1,82	211,07	42,79
	*160,0 (1996)		*5,35		* 124,00	

* Precipitaciones y caudales correspondientes al 7 de agosto de 1996 usando el procedimiento de la metodología.

Resultados alcanzados con las sinergias surgidas entre las obras hidráulicas de corrección de los cursos torrenciales y las reforestaciones de sus cuencas vertientes

Cuenca del torrente de Arratiecho

En la cuenca del torrente de Arratiecho han surgido sinergias entre las reforestaciones y las obras hidráulicas de corrección ejecutadas en sus cursos de drenaje, especialmente del curso principal, y las de fijación de su ladera noreste. Se ha conseguido estabilizar la cuenca y regular los ciclos del agua y de los sedimentos en ella ante precipitaciones torrenciales; luego se han cumplido los objetivos planteados con el proyecto de RH-F.

Cuenca del torrente de Arás

En la cuenca del torrente de Arás, las sinergias entre las obras hidráulicas de corrección de los cursos que drenan por ella, especialmente el curso principal, y las reforestaciones ejecutadas en las áreas vertientes a ellos se han dado y se dan, pero ocasionalmente han ocurrido situaciones de total desconexión; la última y más notoria fue la que se produjo durante la

crecida del 7 de agosto de 1996, en la que el sistema de corrección hidráulica de los tramos de la garganta y del cono de sedimentación del torrente quedó totalmente destruido, mientras que las cubiertas forestales de sus laderas vertientes se mantuvieron prácticamente inalteradas, lo mismo que las reforestaciones de las áreas dominantes de la cuenca vertiente. Dicha tormenta y el desencadenamiento posterior del fenómeno geotorrencial en la cuenca del torrente de Arás presentan la complejidad suficiente para ser analizada en un artículo específico posterior.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Análisis de los resultados relacionados con la protección de las cubiertas forestales

Dada la extensión espacio-temporal de lo que se analiza, la única forma de enfocarlo y entenderlo es utilizando un procedimiento de aproximaciones sucesivas. Adoptando esta línea, se ha razonado como sigue: a) en una primera aproximación se limita a comparar las imágenes de un mismo paraje o simplemente de una misma localización de la cuenca objeto de análisis, antes de la ejecución en el mismo de un proyecto de RH-F y transcurrido un periodo desde que este fuera ejecutado; se puede obtener un resultado visualmente muy efectivo, pero no se puede clasificar de científico-técnico en sentido estricto; b) en la segunda aproximación se considera también el modo en que se llevó a cabo la transformación del paraje o localización objeto de comparación; este paso supone asociar la transformación producida con la aplicación de ciertas técnicas sobre el territorio para conseguirlo y aporta mayor información, aunque en principio esta no resulte comparable; c) en la tercera aproximación se plantea, además de los contenidos de las dos primeras, el objetivo que se pretende alcanzar en el futuro para la cuenca con su RH-F; lo que implícitamente conduce a tener un *esquema conceptual* de lo que se piensa poder alcanzar en la cuenca, que estará más o menos configurado dependiendo de la experiencia del proyectista. Este *esquema conceptual* es comparable con los resultados realmente obtenidos en la cuenca a través de su proyecto de RH-F tras un periodo de haberse ejecutado (al margen de todos los imponderables que en un proyecto a largo plazo puedan surgir).

En consecuencia, si el objetivo de las reforestaciones ligadas a la RH-F en una cuenca es alcanzar en el futuro para ella unas cubiertas forestales, que aseguren a largo plazo el sistema corrector proyectado con su RH-F y, transcurrido el periodo de análisis adoptado, la cuenca posee dichas cubiertas protectoras; estas se pueden contrastar utilizando los tipos de montes protectores (TMP) definidos en la *metodología*.

En el caso de la cuenca del torrente de Arratiecho, 16 de sus 22 tipos de unidad protectora (TUP) pertenecen a las clases de TMP definidas como muy buena y buena (tabla VII). Tratándose de la cuenca del torrente de Arás, 41 de sus 50 TUP pertenecen a las clases de TMP definidas como muy buena y buena (tabla VIII); por lo que las reforestaciones llevadas a cabo en ambas cuencas en el pasado a través de sus respectivos proyectos de RH-F han sido efectivas.

Análisis de los resultados relacionados con la protección que aportan las obras hidráulicas de corrección de cauces torrenciales

La *metodología* utiliza la *fórmula racional* modificada por Témez para evaluar el efecto de la RH-F de las cuencas de montaña sobre las crecidas de los torrentes que circulan por ellas, que está diseñada para determinar los caudales punta de avenida en cuencas de pequeña superficie, como son las dos que se analizan. La cuenca del torrente de Arratiecho tiene 1,6 km² y la del torrente de Arás 19,25 km².

Un problema que se puede plantear al aplicar la *fórmula racional* modificada por Témez es que su ecuación utiliza la intensidad de la precipitación I_t para el tiempo de concentración t_c ; por lo que, si la superficie de la cuenca es muy pequeña, el tiempo de concentración t_c , que se establece mediante ecuaciones empíricas, puede resultar muy reducido y ello derivar a que las curvas de Intensidad-Duración de las precipitaciones proporcionen valores muy altos para la intensidad I_t a introducir en la *fórmula racional*. Sin embargo, este problema no se ha dado en las cuencas analizadas; utilizando la ecuación propuesta por Témez para el tiempo de concentración, se obtuvieron los resultados siguientes: a) para la cuenca del torrente de Arratiecho: $t_c = 0,81$ horas, y b) para la cuenca del torrente de Arás: $t_c = 2$ horas.

Cuenca del torrente de Arratiecho

Para comprobar que se ha cumplido el objetivo de reducción de los caudales punta de crecida en la cuenca del torrente de Arratiecho conforme su proyecto de RH-F se ha ido consolidando, se ha definido una sección de análisis para dos fechas diferentes: a) durante la ejecución de su proyecto de RH-F, entre 1903 y 1907, y b) en la situación actual.

La sección en cuestión es la que intercepta la carretera N-260 en la cuenca y coincide con el final de su garganta y el inicio del cono de sedimentación del torrente (figs. 2, 7 y 17c). Para dicha sección don Pedro de Ayerbe (1903) diseñó un badén parabólico interrumpiendo el encauzamiento del torrente en la misma; el badén mantenía la anchura de 5 metros del encauzamiento de forma prácticamente rectangular.

a) Entre 1903 y 1907, la capacidad de evacuación de dicho badén debía adecuarse al caudal punta de crecida del torrente en dicha fecha y esta capacidad coincide con el caudal determinado utilizando la fórmula de Témez, para las precipitaciones máximas registradas en la estación de Biescas en el periodo del que se dispone de registros (tabla IX) y estimando la escorrentía directa en la cuenca para un NC = 95, que es el valor más probable que tuviera esta cuando se ejecutó el proyecto.

b) Actualmente, en la citada sección el flujo del torrente es conducido por debajo de la carretera N-260 mediante dos tubos de 600 milímetros de diámetro (fig. 17c, imágenes inferiores), antes de incorporarse al canal de evacuación del cono de sedimentación.

Atendiendo a ambas situaciones, se comenta que la precipitación máxima anual en 24 horas en el año 1992 fue: $P_{\text{máx}\cdot 24 \text{ horas}} = 165$ milímetros (tabla IX) y se dio el 8 de diciembre. El caudal punta que aparece en la tabla IX para ese día está calculado para un NC = 60 y resulta $q_p = 16,53 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Si el caudal se hubiera calculado para un NC = 95, que se estima para la cuenca entre 1903 y 1907, el resultado es: $q_p = 40,10 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Este caudal puede parecer un valor extremo; pero para el día 7 de agosto de 1996, que registró una precipitación $P_{\text{máx}\cdot 24 \text{ horas}} = 160$ milímetros, el caudal obtenido aplicando a la cuenca un NC = 95 es similar: $q_p = 35,41 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ y aplicando un NC = 60 se reduce a $q_p = 5,35 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

La sección de evacuación proyectada por don Pedro de Ayerbe en el encauzamiento de su cono de sedimentación (figs. 7 y 17b, imágenes superiores) tiene capacidad para evacuar del orden de $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; pues el canal situado aguas abajo de la carretera N-260, que es la continuación inmediata del badén, tiene una geometría casi rectangular de anchura $b = 5$ metros y calado $y = 1$ metro, siendo su pendiente media $j = 0,06 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$. Tomando como coeficiente de rugosidad del mismo un número de Manning $n = 0,03$ y aplicando la ecuación de continuidad, resulta:

$$q = [b \cdot y] \cdot \frac{(y^{0,667} \cdot j^{0,5})}{n} = 40,82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Que coincide con lo estimado por don Pedro de Ayerbe, atendiendo a la magnitud que presentaban las recurrentes crecidas del torrente de Arratiecho de su época.

En la situación actual, con los dos tubos de 600 milímetros de diámetro y la carretera elevada 0,5 metros sobre la rasante original (imágenes inferiores de la figura 17c) que sustituyen al badén inicial, la capacidad de evacuación está mucho más próxima al caudal que resulta de aplicar la ecuación de Témez asignando a la cubierta forestal de la cuenca un $\text{NC} = 60$. Se trata de valores de entre 2 y $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para precipitaciones torrenciales ordinarias, que puede multiplicarse por cinco tratándose de precipitaciones torrenciales extraordinarias (tablas IX y X), pero no hay constancia de continuas interrupciones de la carretera N-260 por las crecidas del torrente, como en el pasado. Resumiendo, la RH-F de la cuenca del torrente de Arratiecho ha conseguido regular los ciclos del agua y de los sedimentos en la misma, cuando en ella suceden precipitaciones torrenciales.

Cuenca del torrente de Arás

La lectura de las cuatro últimas columnas, referidas al torrente de Arás, de la tabla IX conduce a las siguientes conclusiones: 1) que la crecida del 11 de junio de 1929 en el torrente de Arás se debió a un aguacero local, pues no se registró ninguna precipitación torrencial en la estación de Biescas ese

día; 2) que entre la crecida anterior y la que tuvo lugar el 7 de agosto de 1996, día del trágico accidente en el torrente, ocurrieron 14 crecidas torrenciales, sin contar la crecida del día del accidente, cuyos caudales se estiman en más de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y de estos 6 superan los $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 3) la crecida del 8 de diciembre de 1992 se estimó en $211,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, casi el doble de los $124 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ estimados para la crecida del 7 de agosto de 1996 utilizando en ambos casos el procedimiento establecido en la *metodología*.

La tabla IX no está pensada para eventos puntuales, atiende simplemente a los criterios adoptados en la *metodología*, pero sus resultados apuntan a que a partir de los dos primeros proyectos de RH-F de la cuenca del torrente de Arás, la regulación del ciclo del agua ante la ocurrencia en ella de precipitaciones torrenciales se fue afianzando; por lo que el suceso de la tarde-noche del 7 de agosto de 1996 quizá deba interpretarse como un accidente ligado a la precipitación extraordinaria de ese día, por ejemplo, a una corriente con arrastres o una lava de sedimentos, más que a una consecuencia directa del caudal de crecida generado por dicha precipitación.

Prescindiendo de la catástrofe ocurrida en el torrente la tarde-noche del 7 de agosto de 1996, que se analizará en otro artículo, la situación de la cuenca y del propio torrente de Arás en relación con el control de las crecidas torrenciales en el periodo 1927-2012 puede representarse por la curva de *caudales reales estimados* de la figura 25. La reconstrucción de la garganta y del cono de sedimentación del torrente de Arás con el tercer proyecto de RH-F (1996-2000) ha mejorado sustancialmente la estabilidad de las obras de corrección hidráulica levantadas en los cauces de la cuenca, especialmente en los torrentes de Arás y Betés, pero no ha alterado el proceso de regulación del ciclo del agua en la cuenca iniciado con los dos proyectos anteriores. Durante la crecida del 7 de agosto de 1996 no hubo daños señalados ni en la cuenca del torrente de Arás, ni en las laderas vertientes a los cauces que drenan por ella, únicamente en los propios cauces, y el tercer proyecto solo se ocupó de ellos.

Previamente a la tabla IX se elaboraron tres tablas para estimar los hipotéticos caudales máximos en las secciones de salida de las cuencas de Arratiecho y de Arás, para todas las precipitaciones máximas en 24 horas anuales en las estaciones de Biescas (códigos 9454 y 9454A) en el periodo 1927-2012 y para tres supuestas cubiertas forestales en cada una de las

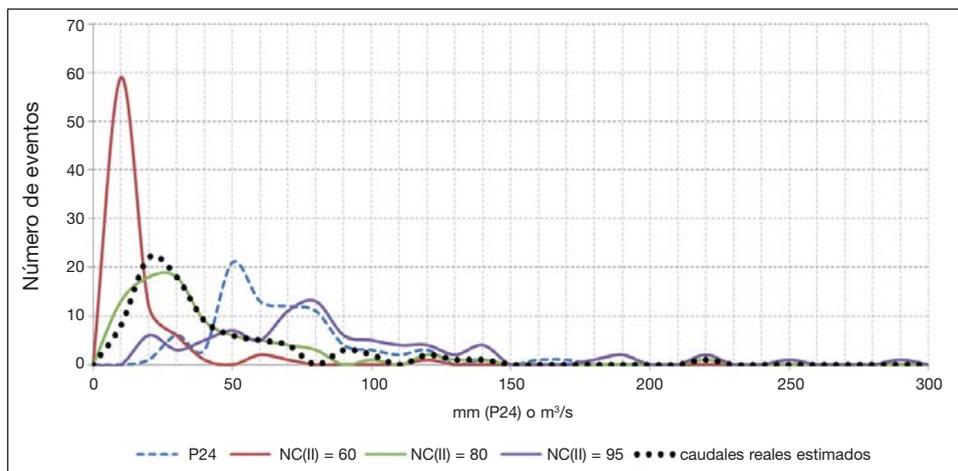


Fig. 25. Frecuencia de las $P_{\text{máximas}}$ en 24 horas anuales (mm) en las estaciones Biescas E I A y Biescas Central II (códigos 9454 y 9454A) en el periodo 1927-2012 (representada en la imagen por P24). Frecuencia de los caudales punta hipotéticos q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) en la cuenca vertiente al torrente de Arás correspondientes a dichas precipitaciones dependiendo del NC adoptado: NC = 60, NC = 80 y NC = 95. Frecuencia de los caudales punta reales estimados q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ajustados al estado físico de la cuenca vertiente al torrente de Arás en las diferentes etapas del periodo 1927-2012 para las mismas precipitaciones.

cuencas, definidas por los números de curva NC = 95, NC = 80 y NC = 60. En la tabla IX se recogen únicamente los caudales máximos en las situaciones en las que la cubierta forestal fuera la más probable en el momento del aguacero causante del correspondiente caudal, que en la cuenca del torrente de Arás coincide con *caudales reales estimados* de la figura 25.

La figura 25 es el resultado de tratar estadísticamente toda la información mencionada en el párrafo anterior. En el eje de ordenadas se muestra la frecuencia durante el periodo 1927-2012 de cada uno de los eventos que se enumeran en el eje de las abscisas con diferentes trazos y colores y que son los siguientes:

- a) Las $P_{\text{máximas}}$ en 24 horas anuales (mm) (P24, azul a trazos).
- b) Los caudales punta en la sección de salida de la cuenca q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) suponiendo para esta un NC = 60 (NC [II]) = 60 (marrón en línea continua).
- c) Los caudales punta en la sección de salida de la cuenca q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) suponiendo para esta un NC = 80 (NC [II]) = 80 (verde en línea continua).
- d) Los caudales punta en la sección de salida de la cuenca q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) suponiendo para esta un NC = 95 (NC [II]) = 95 (morada en línea continua).

e) Los caudales punta en la sección de salida de la cuenca q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) en las condiciones definidas en la tabla IX, que se estiman las más ajustadas al estado físico de la cuenca en el periodo estudiado y, por tanto, los caudales reales estimados (negro a puntos).

Los gráficos de la figura 25 señalan que la mejora de la cubierta forestal de la cuenca reduce la magnitud de sus caudales punta e incrementa su frecuencia. En el caso de la cuenca del torrente de Arás para el periodo 1927-2012 sus caudales punta están regidos por unas condiciones de la cuenca en torno al $NC = 80$. Pero los gráficos también reflejan que el número de sucesos normales es muy superior al de los extraordinarios. Además, se da la circunstancia de que la eficiencia de la cubierta forestal de la cuenca como reguladora del ciclo del agua y de los sedimentos es mayor para los primeros que para los segundos (MINTEGUI y ROBREDO, 2008).

La comprobación de estos efectos implica evidentemente su medición y no es habitual que los torrentes dispongan de dispositivos de aforo y menos durante un periodo lo suficientemente prolongado como para verificar plenamente las hipótesis planteadas, por lo que las conclusiones se limitan al rango de tendencias o a análisis puntuales muy definidos, que en cualquier caso se deben tener en cuenta en futuras monitorizaciones.

Análisis de los resultados asociados a las sinergias surgidas entre las obras hidráulicas de corrección de los cursos torrenciales y las reforestaciones de sus cuencas vertientes

Las RH-F de las cuencas de los torrentes de Arratiecho y de Arás han conseguido regular el ciclo del agua para situaciones de precipitaciones torrenciales en ambas cuencas y dicha regulación se mantendrá, mientras sus cuencas conserven sus actuales cubiertas forestales. En el caso del torrente de Arratiecho lo expuesto resulta más evidente e incluso se podría considerar que también se ha conseguido la regulación del ciclo de los sedimentos, algo que no se puede afirmar de igual modo para la cuenca del torrente de Arás. Los comentarios siguientes se centran en analizar esta cuestión.

Para corregir un torrente de montaña no es suficiente con la regulación de sus caudales líquidos de crecida, aunque esta sea condición necesaria, se precisa controlar también los caudales sólidos, y para ello resulta imprescindible

el mantenimiento en buen estado de las obras hidráulicas de corrección ejecutadas en el torrente, porque de ellas depende que la corriente discurra con una velocidad que le permita evacuar las crecidas sin alterar su lecho, es decir, manteniendo su pendiente de compensación. Si surge un problema en una o varias estructuras hidráulicas ubicadas en el torrente, este puede causar que la corriente adquiera en las crecidas una carga de sedimentos importante, capaz de alterar la estabilidad de todo el curso. Por esta razón es necesario efectuar revisiones periódicas de las obras y de manera muy especial tras las crecidas ocurridas en el torrente, para conocer cómo han afectado a las obras.

Abundando en lo anterior, la naturalización de un torrente no asegura su estabilidad, se trata únicamente de su adecuación a un ecosistema que por su dinámica es inestable. La corrección de los torrentes implica necesariamente controlar que su funcionamiento se adecue a lo previsto para él en su proyecto de corrección y llevar a cabo su seguimiento. En este contexto entran en juego las sinergias entre las obras hidráulicas de corrección y las cubiertas forestales.

Cuenca del torrente de Arratiecho

En un seguimiento reciente a este torrente en julio de 2016, se pudo comprobar que los ciclos del agua y de los sedimentos en este funcionan adecuadamente ante la ocurrencia en la cuenca de precipitaciones torrenciales, pero se observó que las crecidas del torrente transportan una carga de sedimentos en suspensión significativa, que se deposita en el canal y también se adhiere a las paredes de los diques construidos a lo largo de su recorrido, incrustando depósitos de sedimentos en sus estructuras (fig. 17*b*). En ocasiones estos depósitos llevan incorporadas semillas de árboles, que posteriormente germinan y sus raíces se extienden por la propia obra, que al ser de mampostería puede resultar dañada; además de extenderse por el canal y obstruirlo. Estos problemas requieren ser atendidos, se debe revisar el estado de los diques transversales al canal y, si es preciso, limpiarlos y reforzarlos, pues se trata de estructuras que a su vez aseguran la estabilidad de las obras de sistematización de la ladera noreste que sujeta a la morrena; además, conviene despejar algunas de las secciones de evacuación del canal en ciertos tramos. Esta atención es prioritaria en los dos primeros tramos, de los cuatro señalados anteriormente al describir el torrente, a partir del inicio de la garganta de la cuenca. Cabe señalar que la corrección del torrente de Arratiecho y de su cuenca vertiente,

por el modo en que están realizadas sus obras y la reforestación que los arroja, constituye un ejemplo singular del patrimonio histórico-natural de la villa de Biescas, y su conservación en un estado lo más próximo a la restauración original, siempre garantizando, en primer lugar, la seguridad ante el riesgo de crecidas torrenciales, es un motivo a tener en cuenta.

Cuenca del torrente de Arás

En la cuenca del torrente de Arás, aunque se hayan dado sinergias, también han surgido desconexiones entre las reforestaciones llevadas a cabo en sus áreas dominantes y las obras ejecutadas en los cauces de sus torrentes, así como entre estas y las revegetaciones realizadas en las laderas vertientes directas a los cauces. Estas desconexiones se han dado al menos en dos ocasiones que se corresponden con las crecidas del 11 de junio de 1929 y 7 de agosto de 1996; pero en la última tanto las reforestaciones como los trabajos de sujeción de las laderas mediante revegetación funcionaron correctamente, aisladas de lo que ocurrió en la garganta y cono de sedimentación del torrente.

Las causas de la rotura de los diques situados en el torrente de Arás el 7 de agosto de 1996 fueron múltiples, la principal la magnitud de la precipitación que incidió en su cuenca dicho día y desencadenó en ella el fenómeno geotorrencial; pero también pudo contribuir en menor medida la presencia de vegetación leñosa en el cauce del torrente, obstruyéndolo, introduciéndose por las oquedades de los mampuestos de las obras, y debilitando su estructura, efecto que se ha comentado en el párrafo anterior al describir lo que sucede en el torrente de Arratiecho. Tras la reconstrucción de la garganta y del cono de sedimentación del torrente de Arás con su tercer proyecto de RH-F (1996-2000), las nuevas obras de hormigón o de perfiles laminados no corren el peligro de las antiguas de mampostería hidráulica ubicadas en el torrente antes del catastrófico suceso. No hay peligro de que la vegetación leñosa penetre en sus estructuras y las debilite. Pero existe riesgo, si el cauce se llena de vegetación leñosa especialmente si es arbórea, de que una crecida extraordinaria del torrente lo arranque de golpe y lo arrastre aguas abajo, pudiendo causar daños bien por taponamiento de secciones críticas del encauzamiento del torrente (por ejemplo, en el repartidor que se muestra en la imagen superior de la figura 18*b*), lo que provocaría a continuación un desbordamiento; o bien porque la corriente de la crecida

arrastre la vegetación leñosa hasta la carretera N-260. Por ello, se insiste de nuevo en la vigilancia de las obras de corrección de torrentes.

CONCLUSIONES

Se diferencia entre a) las que resultan del estudio de los torrentes de Arratiecho y Arás y sus cuencas vertientes, y b) las que de un modo general afectan a los proyectos de RH-F.

Conclusiones específicas de los torrentes de Arratiecho y de Arás y sus cuencas vertientes

Los proyectos de RH-F de las cuencas vertientes a los dos torrentes se redactan y ejecutan ante dos necesidades concretas: a) mantener operativa la carretera N-260 frente a la amenazada de las crecidas de ambos torrentes de interrumpirla; b) garantizar la seguridad y productividad de los aprovechamientos agropecuarios en una parte importante de los terrenos situados en sus áreas dominadas.

En las dos cuencas sus primeros proyectos de RH-F (el único tratándose de la cuenca del torrente de Arratiecho) contaron con una elevada participación de la población local, que era la más interesada en que los proyectos surtieran sus efectos cuanto antes.

Los proyectos tuvieron una impronta empírica muy importante, pero ello no les resta valor. Por el contrario, han sido una fuente de conocimiento para el futuro.

Las sinergias surgidas entre las obras de corrección de los torrentes y las reforestaciones ejecutadas en sus áreas vertientes para reforzar la eficacia de las primeras y prolongar su vida útil, han sido más precisas en la cuenca del torrente de Arratiecho que en la cuenca del torrente de Arás. En ello ha podido influir su menor superficie y con ello una menor intensidad del fenómeno geotorrencial en la cuenca, aunque su dinámica sea la misma.

Los resultados de los proyectos de RH-F de las cuencas de ambos torrentes de Arratiecho y de Arás han sido lo suficientemente satisfactorios como para que en ocasiones se olvidara la razón que motivó sus ejecuciones:

reducir el peligro ante los riesgos naturales. Hay que recordar que el riesgo no depende solo del peligro, sino también de la exposición y de la vulnerabilidad. No se deben realizar actividades que impliquen asentamientos expuestos, vulnerables y permanentes en los conos de sedimentación de los citados torrentes.

Los torrentes de Arratiecho y de Arás experimentan crecidas repentinas de caudales líquidos y sólidos, por ello han sido corregidos y sus cuencas reforestadas, pero la RH-F, que engloba ambas operaciones, se debe acompañar de un seguimiento permanente del sistema corrector, para conocer el comportamiento del torrente y de su cuenca vertiente, analizar el estado de las obras y la evolución de las reforestaciones y planificar y ejecutar las revisiones que sean necesarias, para que los objetivos que se plantearon con la ejecución de la RH-F se sigan atendiendo.

Conclusiones que afectan a la RH-F de las cuencas vertientes de montaña en general

Los trabajos y obras de RH-F, que en la primera mitad del siglo XIX se conocían como *trabajos de restauración de montañas*, no se cuestionaron hasta el último tercio del siglo XX, y no en todos los lugares se han cuestionado de igual manera.

Esta prevención hacia ellos y, sobre todo, su asentamiento en la opinión pública se debe a diversos factores, quizá los principales sean: a) la reducción de la población rural permanente en las áreas de montaña, que fueron sus principales valedores y destinatarios; b) el periodo tan dilatado en que comienzan a surtir sus efectos, lo que motiva que sus perceptores no conozcan las razones que los motivaron, y c) el cambio sustantivo en la mentalidad de la sociedad actual en relación con el medio natural y, en especial, con las áreas de montaña.

Aunque en las últimas décadas la población rural en la montaña haya disminuido considerablemente, este espacio se ha vuelto a ocupar con gente de la ciudad, que lo utiliza principalmente para su esparcimiento y recreo. Conviene recordar a los nuevos pobladores que los riesgos en la montaña son los mismos que existían en el pasado y que resulta necesario no solo reconocerlos, sino también protegerse de ellos.

Se ha presentado una *metodología*, con las limitaciones propias de una primera aproximación, para evaluar la importancia de los trabajos de RH-F realizados en el pasado en cuencas de montaña empleando criterios que pensamos asumibles para la sociedad actual. La circunstancia de que la montaña sea cada vez más utilizada como esparcimiento y recreo ha creado en el imaginario colectivo la sensación de un nuevo edén, algo esencialmente bueno capaz de transmitir buenas sensaciones. En realidad, el medio natural no es ni bueno ni malo, carece de voluntad para serlo y, normalmente, tampoco se nos muestra en un estado virginal. Conviene recordar que no todas las intervenciones realizadas en él han constituido alteraciones negativas y reconocer las actuaciones positivas llevadas a cabo en las cuencas de montaña del pasado con las RH-F, que supieron respetar la evolución natural de los escenarios afectados y mejorarlos, garantizando con ello su permanencia para las generaciones futuras. Así como también la necesidad y obligación moral de la sociedad de continuar con esta tarea.

EPÍLOGO Y RECONOCIMIENTOS

En este artículo se ha comentado que el bosque es un elemento regulador de los procesos geotorrenciales que desencadenan los aguaceros en las cuencas de montaña, reduciendo con ello los riesgos para las poblaciones asentadas en ellas y para sus visitantes. El bosque también asegura la eficacia y prolonga la vida útil de las obras de corrección hidráulica ejecutadas en los torrentes. Además, una buena estructura de la masa boscosa puede mejorar los efectos de protección ante los riesgos naturales.

La idea del bosque protector ante los riesgos naturales en la montaña adquiere importancia en la primera mitad del siglo XIX con los trabajos conocidos como *restauración de montañas* que por entonces se ejecutaban en los Alpes. A nuestro país este concepto nos llega fundamentalmente a través de los ingenieros franceses de *Eaux et forêts* (*Aguas y bosques*), cuyos principios y técnicas se incorporan en los planes de enseñanza de los ingenieros de montes y en Aragón alcanza su máximo desarrollo en las tres primeras décadas del siglo XX. Este artículo sirve de recordatorio a la importante labor desarrollada por la Sexta División Hidrológico-Forestal en el Pirineo aragonés y pone de manifiesto la necesidad de preservar los

bosques surgidos de las reforestaciones realizadas en el pasado por las comunidades de la cuenca del Alto Gállego, para que mantengan su eficiencia ante los riesgos naturales en el presente y en el futuro.

Para el contenido del artículo nos hemos documentado en la tesis doctoral de Santiago Manuel Fábregas Reigosa, *Criterios de aproximación para medir la efectividad de las actuaciones hidrológico-forestales en el control del fenómeno nivo-torrencial en las cuencas de montaña* (Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, UPM, 2015) y para los temas específicos relacionados con la protección de las cubiertas forestales en el estudio *Metodología para la gestión de montes protectores y del estado y efectividad de las obras de ingeniería de riesgos naturales* (2011) del mismo autor. En lo referente al torrente de Arás se ha utilizado el libro de José Nicolás Rodríguez, *Restauración hidrológico-forestal de la cuenca del torrente de Arás* (2001) y se han tenido muy en cuenta los intercambios de ideas e informaciones que nuestra unidad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes mantuvo con los ingenieros de montes Francisco Fábregas Giné y Juan Carlos Delgado Sánchez, que tras la crecida del día 7 de agosto de 1996 estuvieron muy involucrados en la primera fase de la reconstrucción de la garganta y del cono de sedimentación del torrente de Arás. En lo que respecta al torrente de Arratiecho se ha hecho uso del trabajo fin de máster de Ingeniería de Montes de Carlos Párraga Varona, *Comportamiento de los trabajos y obras de la RH-F del torrente de Arratiecho (término municipal de Biescas, Huesca, 1905-2016)*, realizado en el citado Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, de la UPM, 2016. No queremos concluir sin citar las fotografías históricas de los trabajos realizados en los torrentes de Arratiecho y de Arás procedentes de la familia Ayerbe y recogidos en la Fototeca Forestal Española (DGB-INIA, MONTERO y cols., 2007). Por último, por su gran labor divulgativa en el ámbito desarrollado en este artículo se menciona a Carlos Tarazona Grasa, autor del blog <http://esmemoriaus.blogspot.com.es>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILÓ BONNÍN, J. (1976). *Evaluación de inversiones en la ordenación agrohidrológica de cuencas*. Publicaciones del Ministerio de Agricultura. Madrid. 72 pp.
- BATHURST, J. C., J. AMEZAGA, F. CISNEROS, M. GAVIÑO NOVILLO, A. IROUMÉ, M. A. LENZI, J. Á. MINTEGUI AGUIRRE, M. MIRANDA y A. URCIUOLO (2010). Forests and Floods in Latin America: Science, Management, Policy and the EPIC FORCE Project. *Water International*, 35 (2): 114-131.
- DE FERRARI, F., y S. BRUSCHINI (coords.) (2006). *Selvicoltura nelle foreste di protezione: Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d'Aosta*: 225-279. Regione Autonoma Valle D'Aosta. Regione Piemonte. Compagnia delle Foreste. Arezzo.
- DELL'AGNESE, A., B. MAZZORANA, F. COMITI, P. VON MARAVIC y V. D'AGOSTINO (2013). Assessing the physical vulnerability of check dam through an Empirical Damage Index. *Journal Agricultural Engineering*, 44 (2): 9-16.
- FÁBREGAS REIGOSA, S. M. (dir.) (2011). *Metodología para la gestión de montes protectores y del estado y efectividad de las obras de ingeniería de riesgos naturales. A Lurte*. Estudio promovido por la Asociación Sargantana; financiado por FEADER, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, y redactado por Pirinea Consultores Técnicos-Huesca. 137 pp., mapas.
- FÁBREGAS REIGOSA, S. M. (2015). *Criterios de aproximación para medir la efectividad de las actuaciones hidrológico-forestales en el control del fenómeno nivo-torrencial en las cuencas de montaña*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 211 pp.
- GARCÍA DÍAZ, R., J. Á. MINTEGUI AGUIRRE y J. C. ROBREDO SÁNCHEZ (2002). La caracterización del movimiento del agua en laderas, como instrumento de zonificación de los usos del suelo en cuencas de montaña. *Ecología*, 16: 9-29.
- GARCÍA NÁJERA, J. M. (1954). *Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración)*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid. 29 pp.
- GARCÍA NÁJERA, J. M. (1955). *El bosque, el agua y la conservación del suelo: pendiente máxima admisible en los pastizales*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid. 7 pp.
- GARCÍA ROBREDO, F. (2000). *Evaluación económica de las actuaciones de restauración hidrológico-forestal*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- GAUQUELIN, X., y B. COURBAUD (coords.) (2006). *Guide des Sylvicultures de Montagne. Alpes du Nord françaises*. Cemagref de Grenoble. Centre Régional de la Propriété Forestière Rhône-Alpes. Office National des Forêts. Saint-Martin-d'Hères. 289 pp.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2000). *HEC-HMS (Hydrologic Modelling System), 2nd version. Technical Reference Manual*. A. D. Feldman. Washington D. C.
- LICINI, F., y E. PASQUETAZZ (dirs.) (2006). *Selvicoltura nelle foreste di protezione: Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d'Aosta*: 1-224. Regione Autonoma Valle D'Aosta. Regione Piemonte. Compagnia delle Foreste. Arezzo.

- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F., y M. BLANCO CRIADO (1968). *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid. 187 pp.
- LOSEY, S., y A. WEHRLI (2013). *Forêt protectrice en Suisse. Du projet Silva Project-CH à la forêt protectrice harmonisée*. Office Fédéral de l'Environnement. Berna. 29 pp. y anexos.
- MARRACO SOLANA, S. (1999). La restauración hidrológico-forestal en el Pirineo aragonés: tres ejemplos y una conclusión. En A. Madrigal Collazo (coord.), *Ciencias y técnicas forestales: 150 años de aportaciones de los ingenieros de Montes*: 261-270. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- MINTEGUI AGUIRRE, J. Á., y J. C. ROBREDO SÁNCHEZ (2008). *Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña*. UNESCO (Documentos Técnicos del PHI-LAC, 13). Montevideo. 176 pp. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001592/159245s.pdf> [consulta: 31/7/2017].
- MONTERO, G., R. VALLEJO y R. RUIZ-PEINADO (2007). *Fototeca Forestal Española, DGB-INIA*. Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid. Disponible en <http://www.inia.es/fototeca> [consulta: 31/7/2017].
- NICOLÁS RODRÍGUEZ, J. (2001). *Restauración hidrológico-forestal de la cuenca del torrente de Arás*. Grupo TRAGSA-TRAGSATEC. Madrid. 221 pp.
- PÁRRAGA VARONA, C. (2016). *Comportamiento de los trabajos y obras de RH-F del torrente de Arratiecho (T. M. de Biescas, Huesca, 1905-2016)*. Trabajo fin de máster de Ingeniería de Montes. Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 65 pp., planos y anexo del estado del torrente.
- REY, F., J. LADIER, A. HURAND, F. BERGER, G. CALES y S. SIMON-TEISSIER (2009). *Forêts de protection contre les aléas naturels: diagnostics et stratégies, Alpes du sud françaises*. Édition Quae. Versailles. 111 pp.
- SARANDÓN, R., M. GAVIÑO NOVILLO y V. GUERRERO BORGES (2007). *Factors affecting the occurrence of hydrological events and subsequent damages*. Draft Technical. Universidad de La Plata (Argentina). 7 pp.
- SERRADA, R., J. Á. MINTEGUI, J. L. GARCÍA, V. GÓMEZ, J. C. ROBREDO y J. ZAZO (1998). A method for simulating torrential rainfall in experimental plots for the analysis of the hydrological behavior of different types of plant cover and systematic preparation of soil for reforestation. En A. Rodríguez Rodríguez, C. C. Jiménez Mendoza y M. L. Tejedor Salguero (eds.), *The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures*: 165-176. Geofoma. Logroño.
- SURREL, A. (1841). *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Dunod. París.
- TARAZONA GRASA, C. <http://esmemoriaus.blogspot.com.es> [consulta: 31/7/2017].
- TÉMEZ PELÁEZ, J. R. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX. Madrid, 113 pp.