

# HIDROLOGÍA AMBIENTAL: EL PAPEL DE LA GESTIÓN HUMANA DEL TERRITORIO EN EL CICLO HIDROLÓGICO CONTINENTAL Y EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

S.M. VICENTE-SERRANO, J.I. LÓPEZ-MORENO, S. BEGUERÍA

Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus de Aula Dei, Zaragoza, España  
E.mail: svicen@ipe.csic.es; nlopez@ipe.csic.es; sbeguera@ead.csic.es

## RESUMEN

Este trabajo resume la labor investigadora del profesor José María García Ruiz sobre el conocimiento del funcionamiento hidrológico y la variabilidad de los recursos hídricos en ambientes de montaña mediterránea. Su iniciativa para poner en marcha parcelas y cuencas experimentales, y su estudio de registros hidroclimáticos han permitido profundizar en la comprensión de la importancia de las áreas de cabecera en la disponibilidad de agua dentro de la región mediterránea, y cómo no se puede comprender su evolución en el tiempo sin considerar tanto las fluctuaciones climáticas como los profundos cambios de usos de suelo que han afectado a estos espacios en las últimas décadas. Su investigación ha integrado de forma impecable distintas escalas espaciales y temporales, que han proporcionado información clave para la comprensión de procesos a otras escalas. El estudio de los procesos hidrológicos ha sido relacionado con la gestión de los embalses y otras infraestructuras hidráulicas en la región, incluyendo procesos de adaptación al cambio global. Por todo ello, su trabajo representa una de las contribuciones más relevantes y brillantes de la geografía española en la integración de procesos climáticos, hidrológicos y geomorfológicos con aspectos humanos, económicos y sociales.

**Palabras clave:** *Recursos hídricos, cuencas experimentales, caudales, eventos extremos, gestión humana, cambio global, Pirineo, Mediterráneo.*

## ABSTRACT

This work summarizes the research by prof. José María García Ruiz to understand the hydrological functioning and the spatio-temporal variability of water resources in Mediterranean mountains. The installation of experimental plots and catchments, and the study of hydro-climatic records have allowed understanding the key role of Mediterranean headwaters for water supply in the region, and the need to link climatic fluctuations with deep changes in land cover to understand the temporal evolution of water resources. His research represents a bright integration of different temporal and spatial scales, generating each of them key information to understand the processes at the others scales. The knowledge about hydrological processes has been related with the management of dams and other hydraulic infrastructures of the region, and how observed environmental change has affected water management and the hydrology of downstream sectors. As overall, his work represents one of the most relevant and bright contribution of the Spanish geography for integrating climatic, hydrologic and geomorphologic processes with a variety of human and economic aspects.

**Key words:** *Water, experimental basins, streamflow, extreme events, human management, global change, Pyrenees, Mediterranean.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos a los que se enfrentan las sociedades contemporáneas, y en concreto la ciencia hidrológica, es asegurar la disponibilidad de recursos hídricos (agua dulce continental de calidad en forma de caudales superficiales y de recarga de acuíferos) en un contexto de incremento de la demanda de recursos hídricos por el crecimiento y mayor nivel de desarrollo de las sociedades humanas. Además del incremento de la demanda de agua, la generación de recursos hídricos se enfrenta a los retos impuestos por el cambio climático y por los cambios en los usos del suelo. Así, se ha documentado en diversas regiones del mundo un descenso en los caudales de los ríos, y en la disponibilidad de recursos hídricos en las últimas décadas (Milly *et al.*, 2005). Al mismo tiempo, existen evidencias de que se ha incrementado la frecuencia de fenómenos hidroclimáticos adversos como las sequías (Vicente-Serrano *et al.*, 2014) o las inundaciones (Huntington, 2006).

Las actuales proyecciones de cambio climático indican que estas tendencias continuarán e incluso se acentuarán en el futuro en amplias regiones (Prudhomme *et al.*, 2014; Schewe *et al.*, 2014; Alexander *et al.*, 2006). Una de las regiones más afectadas por estos procesos, según las proyecciones de los modelos, es la cuenca mediterránea y en particular la península Ibérica (García Ruiz *et al.*, 2011).

Dentro del ámbito mediterráneo las regiones de montaña han sido identificadas como áreas clave para la producción de recursos hídricos (superficiales y subterráneos) que abastecen las necesidades de las zonas llanas que las rodean (Viviroli

*et al.*, 2007; López-Moreno *et al.*, 2008; García Ruiz *et al.*, 2011). Por ello, conocer cómo ha cambiado la disponibilidad de recursos hídricos en esta región tan poblada, con una climatología tan variable y que ha estado sujeta a cambios muy profundos en su cubierta vegetal y usos del suelo, constituye una prioridad para plantear medidas de gestión y mitigación de los riesgos hidroclimáticos, además de conocer cuáles pueden ser los escenarios futuros más probables.

La comunidad científica ha tratado de dar respuesta a estos interrogantes desde diferentes perspectivas. Algunos autores han analizado los cambios en la generación de recursos hídricos a nivel regional, centrándose en los cambios en la magnitud y régimen de los caudales (P. Ej., Stewart *et al.*, 2005). En la región mediterránea hay múltiples ejemplos de este tipo a diferentes escalas espaciales y con distintas perspectivas temporales, como se constata en la revisión realizada por el profesor García Ruiz y colaboradores en 2011. Muchos de estos estudios han relacionado los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos con factores de circulación atmosféricas (Trigo *et al.*, 2004; Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2011), cambios en los elementos del clima (Morán-Tejeda *et al.*, 2010; Hannaford *et al.*, 2013), o aspectos relacionados con la gestión humana, tanto aquellos relacionados con la creación de nuevas infraestructuras hidráulicas (embalses, canales de riego) y nuevos usos del agua (creación de polígonos de riego) (Batalla *et al.*, 2004), como con cambios en la gestión del territorio (Beguiría *et al.*, 2003). Este tipo de estudios se ha abordado mediante diferentes metodologías y fuentes de información, incluyendo el

análisis de registros históricos a escala de cuenca hidrográfica (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2012), cuencas experimentales a escala de detalle para comprender los diferentes procesos hidrológicos (Gallart *et al.*, 2002; García Ruiz *et al.*, 2008), y modelización hidrológica (López-Moreno *et al.*, 2014). Como se ha mencionado anteriormente, existen numerosos trabajos sobre cambios en los recursos hídricos centrados en distintas regiones del mundo. Sin embargo, son más escasas las visiones integradoras que aborden el problema desde múltiples escalas espaciales y temporales y que conecten los cambios observados con sus mecanismos conductores. La trayectoria del profesor José María García Ruiz constituye un ejemplo paradigmático en este sentido, ya que desde el conocimiento en detalle de los procesos hidrológicos en áreas de montaña obtenido mediante experimentos y observación directa en el campo, llega a la concepción del ciclo hidrológico continental como un proceso de producción de recursos hídricos. Esta perspectiva resulta fundamental para comprender el problema de forma integral. Su actividad en esta línea de investigación se ha centrado fundamentalmente en el Pirineo, aunque también ha realizado estudios en el conjunto de la cuenca del Ebro, en otras cuencas de la Península Ibérica y, por extensión, ha aportado una visión de conjunto válida para toda la cuenca mediterránea.

Junto al estudio de los cambios en la cantidad y estacionalidad de los recursos hídricos, otro aspecto fundamental en la trayectoria del profesor García Ruiz es el análisis de los riesgos hidroclimáticos, fundamentalmente causados por precipitaciones extremas, y los episodios de aveni-

da que generan en las zonas de montaña. Este tipo de riesgos afectan de forma muy notable al conjunto de la región mediterránea y, por supuesto, a la Península Ibérica (P. Ej., Salgueiro *et al.*, 2013). Eventos como las precipitaciones extremas y las inundaciones que las acompañan, además de otros procesos geomorfológicos desencadenados por las mismas, tienen una gran repercusión económica y social, siendo causantes, ocasionalmente, de la pérdida de vidas humanas (P. Ej., White *et al.*, 1997). La frecuencia y magnitud de estos fenómenos de carácter extremo no puede desligarse de las características hidroclimáticas de las cuencas y de su evolución en el tiempo. Por esta razón, resulta necesario abordar estudios a diferentes escalas, para observar los procesos desde una perspectiva amplia, en cuencas hidrográficas grandes y con un lapso temporal suficiente, además de estudios detallados que permitan comprender los mecanismos, tanto climáticos como hidrológicos, que dan lugar a estos fenómenos. Los estudios del profesor José María García Ruiz son un excelente ejemplo de integración en este sentido, pues su amplia producción científica en esta línea de investigación incluye desde la investigación de los procesos climáticos desencadenantes (precipitaciones extremas) y las incertidumbres en su estudio, su acumulación y propagación en forma de caudales excepcionales en cuencas de diferentes características, y su conexión con procesos de erosión y sedimentación en las laderas y los cauces de los ríos. Esta aproximación integradora resulta crucial para comprender estos procesos desde una perspectiva sintética, abordando todas las vertientes y factores que intervienen en la ocurrencia de los riesgos hidroclimáticos.

La labor del profesor García Ruiz en el ámbito de la hidrología ambiental es enorme, con una producción científica muy amplia que aborda desde los aspectos puramente climáticos hasta aspectos intrínsecamente humanos como la gestión de los recursos hídricos, pasando por los cambios de utilización del suelo, el aporte del manto nieve, y los mecanismos de generación de escorrentía, entre otros. Uno de los principales méritos del profesor García Ruiz ha sido la integración de todos estos factores para comprender los procesos hidrológicos, combinando en todo momento aspectos naturales con aquellos humanos y sociales. Además, hay que destacar su labor formativa en este campo, como refleja el hecho de que su labor de investigación ha abierto líneas de trabajo en diversas áreas temáticas que han sido continuadas por sus colaboradores, y que actualmente han dado lugar a equipos de trabajo consolidados en el estudio de los procesos hidrológicos mediante cuencas experimentales en ambientes forestales (Beguiría *et al.*, 2008; Serrano-Muela *et al.*, 2008; Nadal-Romero *et al.*, 2010, 2011 y 2014; Alatorre *et al.*, 2010 y 2012; Lana-Renault *et al.*, 2014; Martínez-Murillo *et al.*, 2013), en estudios de nivología e hidrología nival (López-Moreno & García Ruiz, 2004; López-Moreno, 2005; López-Moreno y Latron, 2008; López-Moreno *et al.*, 2008, 2009, 2011, 2013; Morán-Tejeda *et al.*, 2013; Revuelto *et al.*, 2014), en estudios de recursos hídricos a escala regional (López-Moreno *et al.*, 2007 y 2011; Morán-Tejeda *et al.*, 2012; Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2012; López-Moreno *et al.*, 2014) y en el estudio de extremos hidroclimáticos (Lana-Renault *et al.*, 2014b; Serrano-Muela *et al.*, 2014; Beguería,

2005; Beguería y Vicente-Serrano, 2006; Beguería *et al.*, 2009 y 2011).

A pesar de las dificultades de separación de las diferentes temáticas, en este trabajo hemos revisado la producción científica del profesor García Ruiz en hidrología ambiental a partir de tres ejes temáticos principales: i) hidrología forestal y usos del suelo; ii) recursos hídricos y gestión hidrológica; y iii) extremos hidroclimáticos.

## 2. HIDROLOGÍA FORESTAL Y USOS DEL SUELO

Uno de los grandes temas en la trayectoria del profesor García Ruiz ha sido el estudio de los regímenes hidrológicos de los ríos en sus cuencas de cabecera y los cambios experimentados por los mismos durante el último siglo de historia, atendiendo a los procesos naturales, pero también, y de forma especial, al efecto de los usos del suelo.

La mayor parte de estos estudios se localizan en el Pirineo central español, para los que el profesor García Ruiz contribuyó de forma decisiva a crear una valiosa y completa infraestructura de experimentación y monitorización hidrológica en condiciones naturales. Ésta tiene como momentos clave la instalación de una serie de parcelas experimentales en las que se reproducen distintos usos del suelo de las áreas de montaña, y la instrumentación de tres cuencas experimentales caracterizadas por muy diferentes usos del suelo pero con condiciones físicas similares en cuanto a elevación, pendiente y litología. La estación experimental "Valle de Aísa" se instaló en el municipio del mismo nombre en el Pirineo central español, a 1140 m.s.n.m en una ladera cultivada durante

el sistema tradicional y abandonada en la década de 1950. La estación se instaló en 1991 y permaneció en funcionamiento hasta 2011. Se instalaron nueve parcelas experimentales con diferentes usos del suelo tradicionales y actuales del Pirineo. Todas ellas estaban dotadas de cajas *Gerlach* para la cuantificación de la escorrentía generada y de la erosión producida por cada uno de los usos de suelo: cereal de artigueo (sistema tradicional de agricultura nómada), barbecho, cereal, matorral, pasto, matorral incendiado, dos parcelas de matorral, parcela abandonada tras artigueo y parcela abandonada tras cereal fertilizado. La parcela de cereal y barbecho alternaban de uso cada año reproduciendo la rotación tradicional.

Comprender en detalle los efectos hidrológicos y geomorfológicos que conlleva el incremento de la cubierta vegetal tras el abandono de la actividad agrícola y ganadera en el Pirineo motivó la instrumentación de cuencas experimentales en el Pirineo central aragonés, además de las ya mencionadas parcelas. Dos primeras cuencas se instalaron a lo largo de la década de 1990. Se trata de las cuencas de Arnás y San Salvador, muy próximas entre sí (10 km) pero con una diferente historia en sus usos del suelo. La cuenca de San Salvador muestra una cobertura de bosques densos de haya y pino silvestre, con suelos profundos. La cuenca de Arnás fue cultivada casi en su totalidad hasta mediados del siglo XX, incluso en las pendientes más pronunciadas, mediante agricultura itinerante. A partir del abandono de las actividades agrícolas, la cuenca ha sido colonizada de forma natural por diferentes tipos de matorral y algunas zonas de bosque. En el año 2005, se añadió una tercera, la cuenca de Aragüés, que se caracteriza por

la presencia de una red de cárcavas de elevada densidad que ocupan alrededor del 25% de la cuenca, que también incluye en su cabecera áreas de repoblación forestal mediante pino silvestre. En las cuencas se construyeron estaciones de aforo con sensores de ultrasonidos para medir la altura del agua, turbidímetros para la monitorización del sedimento en suspensión y toma muestras automáticos para recoger el agua durante las crecidas para medir el contenido de material en disolución y suspensión (García Ruiz *et al.*, 2008). Además, se instalaron estaciones meteorológicas completas que han permitido realizar balances hídricos precisos para cada una de las cuencas. También se instalaron piezómetros en algunas de las cuencas y pluviómetros adicionales, y se han realizado campañas esporádicas de medición de la humedad del suelo en la cuenca (Lana-Renault *et al.*, 2007). A estas tres cuencas se debe sumar la cuenca experimental de Izas, instalada por el Instituto Pirenaico de Ecología en 1986 en un sector de cabecera del valle de Tena por encima de 2000 metros de altura, que ha servido para estudiar la hidrología nival y procesos hidro-geomorfológicos representativos del piso subalpino (Alvera & García Ruiz, 2000; Anderton *et al.*, 2004; López-Moreno *et al.*, 2010; Lana-Renault *et al.*, 2011; Revuelto *et al.*, 2014). Estas parcelas y cuencas experimentales han aportado una información crucial para comprender los procesos hidrológicos bajo condiciones de distinto tipo de cubierta vegetal, constituyendo herramientas esenciales para explicar la variabilidad espacial y temporal en la disponibilidad de recursos hídricos en el Pirineo (López-Bermúdez *et al.*, 1993; García Ruiz & Gallart, 1997).

En una primera etapa las investigaciones se basaron principalmente en la simulación de lluvia en laderas con distinta cobertura vegetal (Ruiz-Flaño *et al.*, 1992; García Ruiz *et al.*, 1994; Lasanta *et al.*, 1994), buscando inferir a partir de los experimentos a pequeña escala el efecto de la vegetación sobre la producción de escorrentía superficial, con la idea de que esta información podría ser generalizada amplias áreas de campos abandonados en el Pirineo central español. Posteriormente, la información proporcionada por las parcelas de la estación experimental “Valle de Aísa” (García Ruiz *et al.*, 1995; Lasanta & García Ruiz, 1998) permitió analizar con más detalle y con un registro temporal continuo el funcionamiento hidromorfológico de distintos usos del suelo tradicionales y actuales que ocupaban la mayor parte de las laderas, caracterizados por la marginación productiva generalizada y la colonización por parte de la vegetación natural. Los resultados mostraron que las áreas de matorral generan bajas cantidades de escorrentía superficial en comparación con los usos característicos de las laderas pirenaicas durante el sistema tradicional (cereal, barbecho o artigueo) (Lasanta *et al.*, 2009; Beguería *et al.*, 2008). Por ejemplo, se pudo determinar cómo la agricultura itinerante ha tenido importantes efectos hidromorfológicos, con importantes tasas de escorrentía, incluso en condiciones de baja frecuencia de cultivo (Lasanta *et al.*, 2006). Estudios más recientes basados en los datos de esta estación, considerando casi veinte años de registros, han mostrado que el abandono agrícola ha tendido a reducir la escorrentía superficial como consecuencia de la rápida colonización por matorrales. Los registros de la estación permitieron también

realizar un seguimiento de las tasas de escorrentía a medida que se desarrollaba la colonización vegetal natural de las parcelas abandonadas, para comprobar cómo se registran claras tendencias negativas en la generación de caudal superficial asociadas a la colonización y densificación de la cubierta (Lasanta *et al.*, 2010; Nadal-Romero *et al.*, 2013). En general, los resultados de la estación experimental ‘Valle de Aísa’ han puesto de manifiesto que el abandono de tierras de cultivo en laderas pendientes y la expansión de prados y matorrales suponen un descenso en la escorrentía superficial generada a escala de ladera. Por ello se han llegado a sugerir posibles estrategias de gestión para mejorar la disponibilidad de agua, pues un posible reemplazo del matorral denso por prados en zonas adecuadas para ello conduciría a un incremento en la escorrentía superficial sin un incremento notable de los problemas de erosión (Lasanta & García Ruiz, 1998; García Ruiz & Lasanta, 1998).

Muchas de las hipótesis acerca de la interacción entre vegetación, clima y producción de escorrentía, surgidas a partir del tratamiento de los datos de las parcelas experimentales, se reforzaron con los resultados de las cuencas experimentales de Arnás, San Salvador y Aragüés. Al tratarse de cuencas hidrológicas completas, éstas registran procesos hidrogeomorfológicos más complejos que los registrados cuando se trabaja a escala de ladera en la estación experimental. Así, entran en juego procesos hidrológicos importantes poco presentes en las laderas pero que juegan un papel importante en la hidrología de cuencas. La respuesta hidrológica de las cuencas está muy relacionada con la presencia de cubierta vegetal (García Ruiz

*et al.*, 2000a y 2005; Regüés *et al.*, 2006; Lana-Renault *et al.*, 2010a). La hidrología de las cuencas forestales está dominada por la infiltración y posterior redistribución del agua en el suelo, de manera que el flujo de base y la evolución del nivel piezométrico regulan la generación de caudal en el cauce (Latrón *et al.*, 2008; Serrano-Muela *et al.*, 2008). La producción de escorrentía superficial es muy limitada, y se produce sólo tras la saturación en humedad del suelo, lo que ocurre en pocas ocasiones y sólo en determinados lugares favorables por su topografía. Las zonas de suelo desnudo, en cambio, tienen un funcionamiento hortoniano en el que la producción de escorrentía superficial es mucho más frecuente y se produce cuando la intensidad de la precipitación es superior a la capacidad de infiltración. La cuenca de Arnás, con una mezcla de usos del suelo, presenta un comportamiento complejo en el que las fuentes generadoras de caudal varían a lo largo del año en función del estado de la cuenca y de las características de la precipitación (Lana-Renault *et al.*, 2010a). García Ruiz *et al.* (2008) y Lana-Renault *et al.* (2010b) llevaron a cabo una comparación de la generación de caudal en momentos de avenida en las tres cuencas experimentales, mostrando que la cubierta vegetal es un factor clave que determina la intensidad y estacionalidad de las crecidas, además del volumen anual de caudal. Comprobaron que las cuencas forestales tienden a generar crecidas en invierno y primavera cuando los niveles de los acuíferos están próximos a la superficie. En cambio, las zonas dominadas por campos abandonados cubiertos por matorral tienden a producir el doble de crecidas que las cuencas forestales, y éstas tienen lugar principalmente en primavera

y otoño, coincidiendo con los episodios de lluvias intensas aunque con influencia del estado de humedad de la cuenca. Finalmente, los sectores de las cuencas más erosionados, donde prevalecen los suelos desnudos, responden a todos los eventos de precipitación a lo largo del año.

Los estudios en cuencas también han mostrado que la generación de agua estacional y anualmente se relaciona también con la cubierta vegetal (García Ruiz *et al.*, 2005a). Los coeficientes de escorrentía resultan muy diferentes entre las distintas cuencas, siendo de aproximadamente un 12% en la cuenca forestal, mientras que en zonas de escasa vegetación puede llegar al 70% (Lana-Renault *et al.*, 2010b). De hecho, la cuenca forestal muestra una respuesta hidrológica poco relacionada con el volumen e intensidad de la lluvia, y más ligada a la evolución del nivel freático, determinado por las condiciones climáticas antecedentes. En general, la forma de los hidrogramas es muy diferente entre las tres cuencas, mostrando la cuenca forestal una escasa respuesta a la ocurrencia de precipitaciones, sobre todo en los periodos secos, mientras las otras dos cuencas responden con mayor rapidez ante la ocurrencia de precipitación. Además, los resultados de las cuencas destacan que la relación entre precipitación y caudal es compleja, aspecto crítico ya que en la región mediterránea son las áreas de montaña las que producen la mayor cantidad de recursos hídricos.

Hay que tener en cuenta que aunque la investigación del profesor García Ruiz en el estudio de los procesos hidrológicos se ha centrado en la región pirenaica, también ha estudiado el funcionamiento hidrológico de zonas semiáridas del sector

central del valle del Ebro. Mediante la utilización de simulación de lluvia se comprobó que el abandono agrícola da lugar a un considerable aumento de la escorrentía superficial en el centro del valle del Ebro, aspecto que presenta consecuencias a escala de ladera y de cuenca hidrográfica (Lasanta *et al.*, 1995a y b; Lasanta *et al.*, 1998). Lasanta *et al.* (2000) comprobaron que las zonas anteriormente cultivadas y posteriormente abandonadas en regiones del centro del valle del Ebro dan lugar a una rápida respuesta a la precipitación, con altos coeficientes de escorrentía. Este hecho pone de manifiesto el importante papel de la cubierta vegetal y las posibles consecuencias hidromorfológicas del abandono de tierras de cultivo también en el centro de la Depresión del Ebro, pues tanto las áreas cultivadas como los campos dejados en barbecho tienen una mayor capacidad de infiltración que las tierras abandonadas. En estas áreas las consecuencias del abandono resultan en una colonización por parte de la vegetación mucho más lenta que en el Pirineo debido a las más bajas condiciones de humedad; por lo que el abandono tiene unas consecuencias contrarias en el centro del valle del Ebro a las del Pirineo.

A lo largo de todos estos trabajos relacionados con la hidrología forestal, una de las motivaciones principales del trabajo del profesor García Ruiz ha sido comprender y cuantificar la relación entre la gestión humana del territorio (los usos del suelo) y la hidrología. En este sentido, el rasgo más característico de la evolución de los usos del suelo en las áreas de montaña en España ha sido el abandono de las actividades agrarias y ganaderas tradicionales a medida que aumentaba el nivel de desa-

rrrollo social y económico del país. Este fenómeno no es privativo de España, ya que se ha descrito en muchos otros lugares del mundo, y puede considerarse una tendencia general a medida que avanza el desarrollo de los países. En García Ruiz & Lana-Renault (2011) se hace una revisión de los efectos hidrológicos del abandono de tierras en España. En este trabajo de revisión se comparan los resultados obtenidos en zonas de montaña con los de zonas de llanura y clima semiárido como la depresión central del Ebro o la provincia de Almería. El estudio pone de relieve las diferencias entre ambos ambientes. Mientras que en las zonas de montaña el abandono de los cultivos y el descenso de la presión ganadera lleva a una recuperación bastante rápida de la cubierta vegetal mediante colonización natural, en las zonas de llanura y clima semiárido esta recuperación se produce de forma mucho más lenta, o es incluso inexistente. Las consecuencias hidrológicas son también contrastadas, ya que si bien en las zonas de montaña se ha registrado de forma general un descenso en el caudal de los ríos y en el aporte de sedimento en relación con el proceso de revegetación, en las zonas semiáridas el abandono ha conllevado en ocasiones un incremento de la escorrentía superficial (Lasanta *et al.*, 2000).

### 3. RECURSOS HÍDRICOS Y GESTIÓN HIDROLÓGICA

El interés del profesor García Ruiz por la hidrología de las zonas de montaña no se limita solamente a los aspectos más puramente hidrológicos, sino que alcanza a estudiar el agua (más concretamente el caudal de los ríos) como recurso. Esto se refleja ya en García Ruiz *et al.* (1985),

donde llevó a cabo la primera evaluación integral de los recursos hídricos superficiales del Pirineo central español. Este trabajo describe las características climáticas y los regímenes hidrológicos de los ríos pirenaicos y cómo éstos varían a lo largo de sus cauces, mediante el estudio de las tasas de escorrentía deducidas a partir de la precipitación de la cuenca y los registros de caudal en la red foronómica. García Ruiz *et al.* (2001a) actualizaron la información contenida en la citada publicación de 1985 y mostraron, además de los regímenes y volúmenes medios de los ríos, que existía una evolución temporal del caudal medio y de los eventos de avenida de los ríos a lo largo del periodo estudiado (1960 a 2000). El resultado más relevante fue la constatación de un descenso de los caudales medios en todos los ríos del Pirineo central español, además de cambios en los regímenes fluviales, con claros descensos en los caudales de primavera y acusados estiajes, sobre todo al inicio de la estación estival. Este resultado marcaría parte de la investigación posterior del profesor García Ruiz y de sus colaboradores.

El conocimiento de la influencia de la cubierta vegetal en el balance hidrológico en montaña, obtenido a partir de las parcelas y cuencas experimentales, permitió establecer hipótesis sobre la relación entre el descenso de los caudales y el proceso de revegetación ocurrido a partir del abandono de las actividades agrícolas y ganaderas tradicionales. El papel de los procesos de revegetación se analizó en el conjunto del Pirineo central español en Beguería *et al.* (2002 y 2003), incluyendo también el papel de las oscilaciones climáticas. Este estudio mostró cómo la relación entre la variabilidad climática y los

caudales no se ha mantenido constante en las últimas décadas sino que presenta una tendencia lineal, de manera que una misma cantidad de precipitación anual genera menores caudales hacia el final del periodo estudiado. Este resultado requería de la existencia de otro componente no climático, como es el proceso de revegetación, para explicar la observada reducción de los caudales con respecto a cantidades iguales de precipitación. López-Moreno *et al.* (2011) ampliaron el análisis al conjunto de la cuenca del Ebro, y analizaron la evolución de los caudales en 88 cuencas desde 1950 a 2006. En este estudio también comprobaron un marcado descenso de los caudales en la mayor parte de cuencas, además de cambios en los regímenes fluviales a consecuencia de la regulación hídrica y las diferentes demandas de agua. En el conjunto de la cuenca se comprobó que por sí sola la evolución de las oscilaciones climáticas no puede explicar la evolución de los caudales en el Pirineo, quedando la evolución de la cubierta vegetal como principal factor explicativo de dichos cambios. Además, en las partes medias y bajas del curso del Ebro el estudio comprobó que el descenso es muy superior al experimentado por los ríos pirenaicos, debido a la presión añadida de las demandas urbana, industrial y, sobre todo, agrícola.

La integración de los análisis de todos estos estudios a diferentes escalas espaciales se llevó a cabo en García Ruiz *et al.* (2010a), donde se mostró que los cambios de uso del suelo han tenido consecuencias hidrológicas notables, independientemente de la escala espacial considerada. Las parcelas y cuencas experimentales han permitido determinar que el cultivo de zonas con pendientes pronunciadas produjo

elevadas tasas de escorrentía y a mayores estiajes. La recolonización vegetal ha dado lugar a menores tasas de escorrentía y una menor frecuencia de crecidas. El resultado de conjugar varias escalas (parcelas, cuencas experimentales y cuencas hidrográficas) aportó una perspectiva nueva que permitió afirmar que los procesos observados son válidos para diferentes escalas y actúan a lo largo de todas ellas.

Junto al papel de la cubierta vegetal, otro factor importante en la explicación de los caudales en el Pirineo está determinado por los procesos nivales, relacionados con la frecuencia de nevadas, el espesor y densidad del manto de nieve y los procesos de fusión nival. Esta línea de investigación se inicia en la década de 1980 con trabajos sobre la acumulación de nieve en el Pirineo y su influencia hidrológica. García Ruiz *et al.* (1986) aplicaron balances hídricos para estimar el volumen de nieve retenido en distintas cuencas pirenaicas, y asociar la desigual importancia de las reservas de nieve en el Pirineo central a las condiciones físicas de cada cuenca. Posteriormente, López-Moreno & García Ruiz (2004) analizaron la influencia de la acumulación y fusión de nieve en los caudales del Pirineo central español, comprobando que junto al papel de la cubierta vegetal, el descenso de las precipitaciones invernales en forma de nieve sería un factor clave para explicar el descenso de los caudales, principalmente en primavera, además de afectar notablemente a los regímenes hidrológicos de los ríos. Un trabajo posterior confirmó una tendencia regresiva en la acumulación de nieve en el Pirineo central, que estaba afectando de forma importante a la disponibilidad de agua en los principales embalses pirenaicos du-

rante los meses de primavera (López-Moreno *et al.*, 2008). La importancia de la nieve para explicar los regímenes de los ríos quedó patente en Lana-Renault *et al.* (2010c; 2010d y 2011), que analizaron la escorrentía durante el periodo de fusión en la cuenca de Izas. El estudio demostró la importancia del periodo de fusión con relación a la producción de escorrentía, ya que mientras la lluvia en el periodo de fusión nival representa alrededor del 10% del caudal total anual, el caudal generado durante el periodo de fusión representa el 50% del total anual. Además, se comprobó que el pico de crecida en la cuenca es tardío, registrándose entre mayo y junio, y que los picos de crecida responden tanto a incrementos térmicos puntuales, que cabe relacionar con episodios de fusión acelerada, como a eventos de precipitación.

Hay que destacar también las investigaciones del profesor García Ruiz en los ríos del Sistema Ibérico, y más concretamente de La Rioja. En Martín Ranz & García Ruiz, (1984) y en García Ruiz & Martín Ranz (1992) se llevó a cabo una amplia caracterización del régimen de los ríos de La Rioja, incluyendo un minucioso análisis de los factores condicionantes: relieve y litología, clima, vegetación, etcétera, para mostrar cómo en una región pequeña la diversidad de los procesos hidrológicos puede ser muy notable. El régimen del río Ebro a su paso por La Rioja mereció especial atención (Arnáez *et al.*, 1994). Igualmente, García Ruiz & Arnáez (1984a y b) llevaron a cabo mediciones de caudal en dos cuencas de alta montaña de la sierra de la Demanda, con características muy diferentes de cubierta vegetal, y donde la nieve presenta una elevada frecuencia y

duración. En estos estudio se apuntó ya la importancia que la cubierta vegetal tiene en la generación de caudales y en los regímenes fluviales, pues se comprobó que las zonas forestales presentan mayores caudales en invierno fruto de una más intensa fusión nival, mientras que las zonas más elevadas deforestadas presentan un pico primaveral, coincidiendo con el deshielo generalizado. A la vez, se comprobó que una cuenca forestal muestra menores estiajes debido a su mayor capacidad para retener agua en el suelo.

Junto a los factores fisiográficos y climáticos, y a aquellos relacionados con la gestión del paisaje y la cubierta vegetal, el profesor García Ruiz ha tenido muy en cuenta el papel de la regulación de los ríos y la actual gestión hidrológica de las cuencas en sus estudios sobre los recientes procesos hidrológicos en el Pirineo. La perspectiva con la que ha enfocado este tipo de estudios ha sido doble. Por una parte valorar cómo los recursos hídricos disponibles y la ocurrencia de eventos extremos aguas arriba de los embalses condiciona la gestión de éstos y, al mismo tiempo cómo los embalses alteran las características hidrológicas de los tramos de río situados aguas abajo de las presas. García Ruiz *et al.*, (2001a), presentaron una primera revisión de los aspectos arriba mencionados, aplicados fundamentalmente al embalse de Yesa. De las observaciones generales presentadas en este trabajo se continuó trabajando con más detalle en trabajos sucesivos. Así, López-Moreno *et al.* (2002) analizaron el papel del embalse de Yesa en el control de las avenidas que recibe. Los resultados indicaron que, de forma general, el embalse reduce de una forma muy importante el número de avenidas y

su magnitud aguas abajo de su presa. Sin embargo, la eficacia del embalse para laminar avenidas depende en gran medida de la cantidad de agua embalsada en el momento de producirse las avenidas, que está sujeta a un patrón estacional. Así, las crecidas que suceden en otoño y comienzos del invierno, cuando el embalse está lejos de su nivel de llenado, son completamente laminadas, y de hecho resultan de gran utilidad para aumentar el volumen de embalsado. A finales de invierno, y sobre todo en primavera, el embalse se encuentra a un nivel muy alto con vistas a abastecer la demanda agrícola estival, y su capacidad para laminar las avenidas es muy limitada, llegando en algunos casos excepcionales incluso a generar picos de crecida más intensos que la aportación recibida por el embalse. Un estudio posterior (López-Moreno *et al.*, 2003) confirmó que este patrón es muy similar en todos los grandes embalses del Pirineo central, si bien hay una elevada variabilidad en la intensidad con la que las avenidas se reducen, dependiendo fundamentalmente de la razón de retención (capacidad del embalse respecto a la magnitud del caudal que recibe) y su uso, siendo los embalses de uso mixto (hidroelectricidad e irrigación) los que mostraron una menor capacidad para controlar avenidas. Serrano-Muela *et al.* (2014) demostraron el importante papel de los embalses pirenaicos para reducir la intensidad de las crecidas extraordinarias con el ejemplo de la avenida de octubre de 2012. La importancia de los mismos queda patente en el hecho de que el volumen embalsado en el embalse de Yesa se incrementó de un 16% a un 53% en solamente dos días, lo que supone un almacenamiento de más de 200 hm<sup>3</sup>.

Otra línea de investigación ha sido analizar cómo el descenso de los caudales observado en el Pirineo ha afectado a la gestión de sus embalses. El primer estudio detallado lo realizaron López-Moreno *et al.* (2004c) en el embalse de Yesa. Se pudo comprobar cómo un descenso en la generación de escorrentía en la cuenca dio lugar a una mayor frecuencia de años en los que el embalse termina la temporada de riego a un nivel inferior a la media del periodo. Este hecho obliga a los gestores a retener un porcentaje mucho mayor del agua que recibe a lo largo de la temporada de llenado (desde octubre hasta mayo), incluso durante los meses de primavera; periodo en el que tradicionalmente el embalse liberaba grandes cantidades de agua en previsión de las aportaciones procedentes del manto de nieve, y así poder mantener un margen de seguridad en previsión de posibles avenidas. Dicho estudio se extendió a otros tres grandes embalses del Pirineo (El Grado, Barasona y Santa Ana) destinados al suministro para la agricultura. En todos ellos se observó un cambio de patrón similar, caracterizado por un descenso muy marcado de los aportes. Además, se pudo comprobar cómo la demanda de agua para el riego había aumentado en las últimas décadas, haciendo que las tendencias de los caudales aguas abajo de las presas presentasen valores negativos mucho más acusados que las tendencias observadas en sectores aguas arriba, explicadas únicamente por causas naturales. Este hecho hace que la solución aplicada hasta ahora por los gestores de los embalses para hacer frente a las consecuencias del cambio ambiental pueda ser insostenible en un futuro próximo. Así, los caudales liberados aguas abajo de las presas son actualmente muy bajos y pue-

den ser insuficientes ante los escenarios esperables de incremento de vegetación y cambio climático para las próximas décadas. Esta hipótesis se pudo corroborar mediante un ejercicio de modelización hidrológica y simulación de la gestión del embalse de Yesa en un escenario de cambio ambiental para el periodo 2021-2050 (López-Moreno *et al.*, 2014).

Las tendencias climáticas observadas, los cambios de usos del suelo y la gestión hidrológica se enlazan pues para explicar la evolución reciente de los recursos hídricos en el Pirineo. Sin embargo, la labor del profesor García Ruiz no podría terminar sin haber incluido en su investigación no sólo el pasado y los procesos actuales sino también cuál puede ser la evolución futura de los recursos, incluyendo proyecciones futuras de acuerdo a los actuales escenarios de cambio climático contemplados para la región. López-Moreno *et al.* (2008) analizaron las proyecciones de cambio climático para el Pirineo central español a lo largo del siglo XXI, para comprobar como escenario más probable el de un descenso de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas que podría dar lugar a una aceleración del observado descenso de los caudales pirenaicos. López-Moreno *et al.* (2011) ampliaron dichas conclusiones al conjunto de la cuenca del Ebro. Sin duda, los escenarios de cambio climático considerados en la actualidad implicarán mayores problemas para mantener las actuales aportaciones de agua desde el Pirineo que abastecen diferentes usos en las regiones centrales del valle del Ebro. Además, el escenario más probable es que el proceso de revegetación continúe en el Pirineo mediante una densificación del bosque en las partes bajas, y un incremento altitudi-

nal del nivel del bosque, contribuyendo a la reducción mayor de los caudales de los ríos.

Finalmente, hay que destacar que el estudio de la influencia de la gestión hidrológica y la regulación sobre la disponibilidad de recursos hídricos por parte del profesor García Ruiz no se ha circunscrito a la región pirenaica, sino que se ha extendido a otras cuencas peninsulares como la del Tajo, con diferentes resultados para comprender el papel de la gestión hidrológica y la construcción de embalses sobre la disponibilidad de recursos hídricos en esta cuenca. En López-Moreno *et al.* (2007) se mostró cómo el impacto hidrológico de uno de los principales modos de circulación atmosférica en la Península Ibérica (la oscilación del Atlántico Norte), queda modulado por la gestión hidrológica, principalmente por el grado de regulación de los ríos y las medidas de gestión de los embalses frente a la ocurrencia de años secos y húmedos, mostrando la capacidad de los embalses para gestionar la acusada variabilidad hidroclimática de la cuenca del río Tajo. Sin embargo, los efectos de la gestión hidrológica pueden resultar muy diferentes en dicha cuenca, e incluso presentar una influencia negativa al gestionar los periodos secos. López-Moreno *et al.* (2009b) analizaron el impacto de la construcción de la presa de Alcántara (el primer embalse en volumen de Europa en el momento de su construcción y el segundo en la actualidad) sobre la magnitud y duración de las sequías hidrológicas. Este aspecto presentaba un interés notable desde un punto de vista administrativo y de gestión, al constituir el límite entre dos países en una cuenca transfronteriza. El estudio mostró que durante los periodos

de sequía las descargas aguas abajo de la presa se ven reducidas notablemente, incrementándose la duración y magnitud de los eventos de sequía aguas abajo desde el momento de construcción de la presa, y destacando la capacidad de las presas para modificar los regímenes hidrológicos de ríos altamente regulados, pudiendo ser éstas modificaciones críticas durante los periodos de sequía. La complejidad de las interacciones entre gestión de los recursos hídricos y variabilidad climática quedaron sobre todo patentes en la cabecera del río Tajo, donde a una elevada variabilidad climática se le suma una intensa regulación hidrológica, con embalses de carácter multianual, un proceso de revegetación natural, y ser el origen de un trasvase de agua al levante español. En Lorenzo-Lacruz *et al.* (2010) se analizó el impacto de la variabilidad climática y la gestión hidrológica sobre la disponibilidad de recursos hídricos en dicha cuenca. El trabajo mostró que aunque la influencia de la variabilidad climática sobre la disponibilidad de recursos hídricos es sustancial, se han producido notables cambios en las relaciones hidro-climáticas en sistemas regulados, aspecto muy relacionado con los cambios en la demanda externa desde las cuencas mediterráneas, con la puesta en marcha del trasvase Tajo-Segura desde la década de 1980. Así pues, las investigaciones llevadas a cabo en la cuenca del río Tajo han puesto de manifiesto la necesidad de analizar los procesos de variabilidad climática, enmarcados en un proceso de cambio, con las medidas de regulación y gestión hidrológica en las cuencas, siendo probablemente la cuenca del Tajo un ejemplo paradigmático por su intensa regulación, su carácter transfronterizo y su amplia exposición a oscilaciones climáticas, donde

además las iniciativas para el desarrollo de regadíos han sido muy intensas en las últimas décadas (García Ruiz *et al.*, 2010b).

La investigación sobre la evolución de los recursos hídricos en el contexto del cambio global (cambio climático más cambios en la gestión del territorio) llevó al profesor García Ruiz y colaboradores a publicar en 2011 una muy completa revisión de trabajos centrados en el ámbito mediterráneo. Como es bien conocido, la cuenca mediterránea es una de las áreas calientes en las predicciones de cambio climático, de forma consistente entre distintos modelos. Concretamente, los modelos prevén un incremento de las temperaturas y un descenso de las precipitaciones totales, lo que acentuará el ya elevado estrés hídrico sobre la vegetación natural, los cultivos, y, en menor medida, el consumo humano. Estos cambios conllevarán un descenso en los caudales superficiales de los ríos, cuyas consecuencias ya han constatado diversos estudios a lo largo del Mediterráneo. Al mismo tiempo, la cuenca mediterránea se ha caracterizado por un abandono de cultivos y ganadería en áreas económicamente marginales, y esta tendencia proseguirá en el futuro (sobre todo en los países del sur del Mediterráneo). Esta tendencia se sumará a la evolución climática y supondrá una mayor presión sobre los recursos hídricos, al afectar a la producción de caudales y a la recarga de acuíferos. Los cambios en los aportes totales y en la estacionalidad de éstos harán necesarios importantes cambios en la gestión de las infraestructuras hidráulicas, y aumentará la incertidumbre sobre los recursos hídricos disponibles. Muchos de estos cambios están ya teniendo lugar, y todos los escenarios climáticos

y socioeconómicos apuntan a una menor generación de recursos hídricos paralela a un incremento de la demanda. En estas circunstancias, García Ruiz *et al.* (2011) incidieron en que una de las prioridades de las sociedades de la región mediterránea es avanzar en las estrategias de gestión de los recursos hídricos, incluyendo debates de profundidad sobre las políticas de precios del agua, inversión en nuevas tecnologías del agua y desarrollo de políticas públicas para favorecer una mayor generación de recursos hídricos. Sólo así se logrará garantizar la satisfacción de las demandas hídricas y reducir las tensiones entre usuarios, regiones y países.

#### 4. EXTREMOS HIDROCLIMÁTICOS

Otra de las líneas de investigación hidrológica en las que ha centrado su actividad el profesor García Ruiz es en el estudio de los extremos hidrológicos, su frecuencia y evolución, y los factores desencadenantes, tanto climáticos como de usos y cubiertas del suelo. Ya en algunos estudios a principios de la década de 1980 mostraba su interés por esta temática debido a sus notables repercusiones desde un punto de vista geomorfológico y socioeconómico. En García Ruiz *et al.* (1985) ya se caracterizaron diferentes crecidas de elevada magnitud durante la década de 1960. En este trabajo se mostró que las crecidas no suelen afectar a amplias áreas y que aunque se pueden registrar a lo largo de todo el año, resultan más frecuentes en otoño, fruto de la influencia de la circulación atmosférica.

García Ruiz *et al.* (1980) analizaron la influencia de las características físicas de las cuencas hidrográficas sobre la frecuencia e intensidad de crecidas en el Pirineo

central español, incluyendo variables topográficas, litológicas y de retención nival. Comprobaron que las cuencas pequeñas responden más rápida e intensamente a las precipitaciones máximas, y que los mayores caudales específicos no se dan nunca en las cuencas grandes del Pirineo, mostrando ya gradientes espaciales en la ocurrencia de crecidas. También destacaron que los factores que dan lugar a una mayor o menor frecuencia de crecidas en las diferentes cuencas son complejos, interviniendo el carácter más o menos impermeable de la litología o la pendiente media de las cuencas.

Estos trabajos iniciales se centraban sobre todo en la influencia de las características fisiográficas, sin incluir un factor que posteriormente tendría una gran importancia en su investigación sobre procesos hidrológicos y la ocurrencia de crecidas, como es el papel de la cubierta vegetal. García Ruiz *et al.* (2001b) analizaron en detalle el régimen de las crecidas de los ríos del Pirineo central, demostrando grandes diferencias en la estacionalidad de las crecidas entre unos ríos y otros, relacionadas con el diferente régimen de precipitaciones y con la mayor o menor influencia mediterránea o atlántica. Además, sugirieron que las crecidas más frecuentes habían experimentado una disminución de su frecuencia, apuntándose al cambio en el volumen de las lluvias, la acumulación de nieve y las transformaciones de cubierta vegetal como los principales factores condicionantes.

Las crecidas extraordinarias en el Pirineo central español están determinadas en gran medida por la ocurrencia de eventos de precipitación extremos. El profesor García Ruiz también inició una línea de

investigación sobre esta temática, con la finalidad de caracterizar la frecuencia de estos eventos tanto en el tiempo como en el espacio. Sobre todo se centró en aquellos eventos extraordinarios que producen crecidas de un periodo de retorno elevado, con consecuencias económicas negativas e incluso pérdidas humanas. García Ruiz *et al.* (1998a y b; 2000b y 2001b) analizaron la incertidumbre en la predicción de eventos de precipitación extremos en el Pirineo español. En estos estudios se mostró cómo los eventos más extremos (aquellos correspondientes a más de 100 años de periodo de retorno) presentan una distribución espacial y temporal muy errática, y aparecen de forma extremadamente localizada, lo que dificulta su estudio. De hecho, aquellos eventos que exceden los 200 mm están caracterizados por la ausencia de patrones que determinen su distribución espacial. Estos resultados les permitieron afirmar que los eventos de precipitaciones muy extrema son muy difíciles de predecir con la información recogida en los observatorios meteorológicos. A pesar de ello, avances posteriores basados en técnicas estadísticas más avanzadas permitieron comprobar que el riesgo de ocurrencia de precipitaciones extremas resulta muy generalizado en la totalidad del Pirineo español. Beguería *et al.* (2009) desarrollaron una cartografía sobre la frecuencia de precipitaciones de elevada intensidad, magnitud y duración en el conjunto del Pirineo español, indicando cómo en amplias áreas los valores de precipitación superiores a 150 mm corresponden a un periodo de retorno de tan solo 30 años.

La ocurrencia del desastre del camping de Biescas en agosto de 1996 motivó que el profesor García Ruiz investigara con de-

talle los mecanismos hidromorfológicos que llevaron a la ocurrencia de este desastre (García Ruiz *et al.*, 1996, 1997 y 2004; García Ruiz, 1998; White *et al.*, 1997). Se estimó en más de 160 mm la precipitación caída, y se determinó la manera en que la escorrentía generada se canalizó en la cuenca e interactuó con las condiciones geomorfológicas y las trampas de sedimento existentes para generar una crecida muy cargada de sedimentos que tuvo nefastas consecuencias. El carácter aleatorio, pero frecuente, de este tipo de eventos ya había sido apuntado anteriormente con la descripción de un evento ocurrido en el año 1982 con consecuencias hidromorfológicas similares al desastre de Biescas de 1996, aunque sin pérdida de vidas humanas (García Ruiz *et al.*, 1983). Se puede considerar que la principal enseñanza de estas investigaciones es que aunque las series pluviométricas disponibles puedan no registrar eventos de precipitación muy extremos, ello no implica una ausencia de riesgo, debido a la gran irregularidad espacial y carácter aleatorio de dichos eventos. Se sugirió que para la estimación del riesgo de eventos torrenciales extraordinarios resulta mucho más recomendable recurrir a indicadores hidrológicos y geomorfológicos, como la existencia de abanicos activos a la salida de los torrentes, para lograr una mejor caracterización de la distribución territorial del riesgo por avenidas torrenciales.

Diferentes trabajos publicados por el profesor García Ruiz y su equipo se han centrado en determinar el papel de la cubierta vegetal en la ocurrencia de crecidas extraordinarias. Inicialmente, y basándose en los resultados de la investigación sobre el desastre de Biescas, sucedido en

una cuenca cubierta de forma generalizada por bosque, García Ruiz *et al.* (2001b) señalaron que la existencia de una densa cubierta vegetal podría no tener efectos apreciables en la reducción de la severidad de las crecidas de mayor intensidad, pues la capacidad de retención de agua debido a la interceptación de la lluvia por parte de la vegetación se saturaría en pocos minutos, al igual que la infiltración del suelo, que también saturaría rápidamente, sobre todo en condiciones de suelo húmedo. Dichas hipótesis quedaron confirmadas en un trabajo posterior (López-Moreno *et al.*, 2006), en el que analizando la ocurrencia de avenidas habituales (aquellas en las que los caudales diarios superan en tres, cinco y diez veces el caudal medio de cada mes) se comprobó una tendencia regresiva en las últimas décadas. No obstante, hay que señalar que los eventos hidrológicos más extraordinarios (periodos de retorno de 10 y 25 años), no mostraban tendencias decrecientes significativas. Por tanto, el incremento de la vegetación en zonas de cabecera se apuntaba como la principal causa de dichas tendencias. En esta línea, Serrano-Muela *et al.* (2014) analizaron los impactos hidrológicos de un evento de lluvia excepcional registrado entre el 19 y el 21 de octubre de 2012 en el Pirineo central español. El evento produjo una crecida extraordinaria con un periodo de retorno estimado de entre 400 y 500 años de los ríos, a pesar de que el periodo previo a la misma se caracterizó por condiciones de extrema sequedad y bajos caudales. Los resultados sugerirían que la influencia de las condiciones previas de humedad, o de la presencia de vegetación, serían muy secundarias cuando se registra un evento de precipitación de magnitud extraordinaria.

Sin embargo, otros estudios basados tanto en series históricas de caudales como las observaciones de diferentes cuencas experimentales han mostrado que el papel de la vegetación en la ocurrencia de crecidas importantes puede no ser tan marginal. Lana-Renault *et al.* (2014) llevaron a cabo un análisis de la crecida extraordinaria de octubre de 2012 a partir de los registros de precipitación y caudal en las cuencas de Arnás, San Salvador, Aragüás e Izas. El estudio permitió conocer en detalle la respuesta de la cubierta forestal a una precipitación de elevada intensidad, sugiriendo que la cubierta puede intervenir de forma notable en la generación de la crecida, incluso en eventos de intensidad extraordinaria, al menos bajo condiciones previas de muy baja humedad del suelo. Así, en el evento de octubre de 2012 la cuenca forestal de San Salvador no reaccionó a algunos de los pulsos de precipitación más severa, y registró un pico de crecida únicamente cuando la cuenca se encontró completamente saturada. La cuenca de Arnás, cubierta de forma dominante por matorrales, respondió de forma similar a la cuenca forestal. Por el contrario, la cuenca de Aragüás caracterizada por una elevada presencia de cárcavas (suelo desnudo), reaccionó inmediatamente desde el inicio de la tormenta, al igual que la cuenca de alta montaña cubierta por pastos y afloramientos rocosos cuyo hidrograma fue paralelo al de la intensidad de la lluvia. Así pues, los diferentes estudios sugieren que aunque es probable que ante lluvias muy extremas (200 mm de intensidad en apenas 75 minutos, como fue el caso del desastre de Biescas) la cubierta vegetal tenga un papel marginal, en eventos también extremos aunque más sostenidos en

el tiempo la vegetación puede actuar de forma determinante, tanto aumentando el tiempo de respuesta del caudal respecto a la lluvia, como disminuyendo la magnitud del mismo.

Hay que tener en cuenta que la respuesta hidrológica de las cuencas ante eventos de precipitación de elevada intensidad puede ser muy compleja, con una importante interacción entre la litología, pendiente, cubierta vegetal y las condiciones antecedentes de humedad del suelo. Por ejemplo, en la cuenca de campos abandonados de Arnás se observó una respuesta rápida de los caudales ante precipitaciones de cualquier volumen e intensidad (García Ruiz *et al.*, 2005). Sin embargo, también se apreciaron notables diferencias estacionales y en función de las condiciones previas de humedad del suelo, además de una cierta variabilidad aleatoria (Arnáez *et al.*, 1999), de tal modo que la intensidad de las precipitaciones interactúa con la humedad del suelo, siendo ésta un importante factor determinante de la respuesta del caudal a la precipitación. Serrano-Muela *et al.* (2008) analizaron en detalle el efecto del bosque en la ocurrencia de crecidas a partir de los registros de la cuenca de San Salvador, comprobando que cuando el suelo está húmedo las crecidas pueden ser de igual magnitud a las que se registran en áreas no forestadas. Sin embargo, cuando el suelo está seco, es necesario que se produzcan nuevas precipitaciones para generar una crecida, habitualmente de menor magnitud.

Lana-Renault *et al.* (2007) mostraron que se pueden distinguir cuatro tipos de crecidas de acuerdo con las características de la precipitación, caudal y las condicio-

nes de humedad. Esto refleja el alto grado de variabilidad en la respuesta hidrológica en cuencas forestales, en las que la intensidad de la lluvia se imbrica con las condiciones previas de humedad del suelo y con la capacidad de intercepción y percolación de la lluvia por parte de la cubierta. Ya en un trabajo anterior centrado en datos de la cuenca de Arnás, Seeger *et al.* (2004) utilizaron la relación entre concentración de sedimento y caudal, y su evolución temporal durante episodios de crecida, para caracterizar el funcionamiento hidrológico de la cuenca y los mecanismos de generación de escorrentía predominantes. Así, distinguieron tres curvas de histéresis diferentes, correspondientes cada una a distintos mecanismos. El tipo más frecuente, las curvas en sentido de las agujas del reloj, se produce cuando la cuenca presenta condiciones normales de humedad y las fuentes de generación de caudal y sedimento son próximas al canal. Las curvas en sentido contrario al reloj, por contra, se dan sólo en condiciones muy elevadas de humedad en las que hay una componente fuerte de escorrentía superficial por saturación del suelo, con lo que las áreas fuente de agua y sedimento se expanden por amplias zonas de la cuenca. Las curvas en ocho, finalmente, se dan durante lluvias intensas y prolongadas sobre la cuenca seca, con una aporte significativo de escorrentía por exceso de intensidad (mecanismo hortoniano) y una expansión progresiva de las áreas de contribución desde cerca de los cauces a partes más remotas de la cuenca.

## 5. CONCLUSIONES

A lo largo de su carrera científica el profesor García Ruiz ha realizado algu-

nas aportaciones de gran relevancia a la ciencia hidrológica, y desde luego no se puede concebir la evolución reciente de la hidrología en España sin tener en cuenta sus trabajos, sobre todo los más pioneros realizados en las últimas décadas del siglo XX. Hay que destacar la importancia y carácter innovador que tuvieron en su momento las instalaciones experimentales y la monitorización de cuencas para el desarrollo de la hidrología en nuestro país, ya que supusieron la entrada de métodos y formas de trabajar novedosos y enlazados directamente con las líneas de investigación que se realizaban a nivel internacional. Hay que resaltar, sin embargo, el carácter original y personal que el profesor García Ruiz ha sabido imprimir a todos sus trabajos. La originalidad de la perspectiva del profesor García Ruiz consiste en la transversalidad en la forma de abordar los problemas, proponiendo siempre una combinación de conocimientos y teorías procedentes de campos dispares, pero relacionados, como la climatología, la hidrología y la geomorfología y, más allá, de aspectos humanos, económicos y sociales. La perspectiva histórica en los procesos hidrológicos, tanto en lo que se refiere a la evolución de las sociedades humanas como a los cambios en los procesos geomorfológicos, ha ocupado también siempre un lugar primordial en la investigación del profesor García Ruiz.

A pesar de haber jugado un papel fundamental en la introducción en la geografía española de los métodos cuantitativos y experimentales, la trayectoria del profesor García Ruiz es inconfundiblemente geográfica. En la base de todos sus trabajos en el campo de la hidrología se encuentra siempre una sólida comprensión

de las motivaciones y necesidades humanas, que le han llevado desde relacionar la existencia de dólmenes y otros restos megalíticos con el progreso del pastoreo durante la Edad de Hierro y los cambios en la vegetación y en los procesos hidromorfológicos en la zona subalpina del Pirineo, hasta reflexionar acerca de la gestión actual de los recursos hídricos, el papel de la gestión del territorio, y su posible evolución en un contexto de cambio global.

Finalmente, no podemos dejar de lado la repercusión del profesor García Ruiz a nivel científico y personal en un número elevado de investigadores formados bajo su tutela. La combinación de audacia en la elección de los temas de trabajo, claridad en la definición de las hipótesis, profundidad en los razonamientos, transdisciplinariedad en los argumentos, rigor y exigencia en la aplicación de los métodos y humanidad y brillantez en la exposición de los resultados de la investigación han marcado a toda una generación de geógrafos físicos.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo comenzamos nuestra actividad científica de una u otra manera bajo la supervisión de José María. En todo momento su apoyo ha sido fundamental, bien para el desarrollo de nuestras líneas de investigación principales, bien en momentos clave de nuestras carreras científicas; en esos momentos en los que hay que tomar un camino determinado y se pueden abrir o cerrar puertas con suma facilidad. José María siempre estuvo allí para apostar por nosotros, con una fe en muchas ocasiones inmerecida; apoyándonos en todas nuestras iniciativas, ayudando en los momentos de indecisión e incertidumbre, que han sido unos cuantos, y creyendo en nuestra capacidad para avanzar en la investigación. Su labor ha sido siempre orientadora, inspiradora

podría decirse; sin imponer jamás temas de investigación de acuerdo a sus intereses, y permitiendo que cada uno desarrollara sus líneas de investigación con entera libertad. El apoyo de José María a nuestras líneas de investigación ha sido siempre constante y jamás ha reparado en los medios necesarios para apoyar dichas líneas de trabajo, utilizando con total desinterés hacia él los fondos de investigación disponibles, y poniéndolos a nuestra entera disposición para lo que hiciera falta. Su ingente esfuerzo empeñado en el trabajo también ha sido puesto a disposición de nosotros de una u otra manera. Ese sea probablemente el rasgo más distintivo de la actividad investigadora de José María, ya que toda persona que ha entrado a trabajar en su equipo no lo ha hecho para que el grupo se beneficie de su labor, sino más bien al contrario; que la persona que se incorporara al equipo obtuviera el mayor beneficio científico y curricular, para lo que José María ha dedicado muchísimas horas de trabajo desinteresado. Esta actitud ha hecho que trabajar en el ambiente creado por José María haya sido inmejorable, siendo, sin duda, el mejor lugar donde un geógrafo español podría trabajar en el ámbito científico. Realmente, la deuda que los tres autores han contraído con José María por unas u otras razones es enorme; buena parte de lo que somos científicamente se lo debemos a él y su carácter, humanidad y confianza han dejado una marca personal imborrable. El hueco que José María deja en el grupo de investigación creado por él, hoy plenamente consolidado gracias a su esfuerzo, va a ser imposible de llenar en muchos años.

## 7. REFERENCIAS

- Anderton, S.P., White, S.M. & Alvera B. (2004): Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment. *Hydrological Processes*, 18: 435-453.
- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., et al., (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 111: D05109.

- Batalla, R.J., Kondolf, G.M. & Gómez, C.M. (2004): Hydrological alterations in the Ebro Basin caused by dams. *Journal of Hydrology*, 290: 117–136.
- Beguera S. (2005): Uncertainties in partial duration series modelling of extremes related to the choice of the threshold value. *Journal of Hydrology*, 303: 215–230.
- Beguera S. & Vicente-Serrano S.M. (2006): Mapping the hazard of extreme rainfall by peaks over threshold extreme value analysis, spatial regression techniques. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45: 108–124.
- Beguera S., Angulo-Martínez M., López-Moreno J.I., El-Kenawy A.E. & Vicente-Serrano S. (2011): Assessing trends in extreme precipitation by non-stationary peaks-over-threshold analysis, NE Spain 1930–2006. *International Journal of Climatology*, 31: 2102–2114.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J. & Regúés, D. (2002): Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6: 527–537.
- Hannaford, J., Buys, G., Stahl, K. & Tallaksen, L.M. (2013): The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 2717–2733.
- Huntington, T.G. (2006): Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319: 83–95.
- Lana-Renault, N., Latron, J. & Regúés, D. (2007): Streamflow response and water-table dynamics in a sub-Mediterranean research catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 347: 497–507.
- Lana-Renault, N., Regúés, D., Serrano, P. & Latron, J. (2014): Spatial and temporal variability of groundwater dynamics in a sub-Mediterranean mountain catchment. *Hydrological Processes*, 28: 3288–3299.
- López-Moreno, J.I., (2005): Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37: 253–260.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. & Alvera, B. (2008): Sensitivity of the snow energy balance to climatic changes: implications for the evolution of snowpack in the Pyrenees in the 21st century. *Climate Research*, 36: 206–217.
- López-Moreno, J.I. & Latron, J. (2008): Influence of forest canopy on snow distribution in a temperate mountain range. *Hydrological Processes*, 22: 117–126.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S. & Beniston, M. (2009): Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374: 384–396.
- López Moreno, J.I., Latron, J. & Lehmann, A. (2010): Effects of sample and grid size on the accuracy and stability of regression-based snow interpolation methods. *Hydrological Processes*, 24: 1914–1928.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., González-Hidalgo, J.C. & Morán-Tejeda, E. (2011): The response of Iberian rivers to the North Atlantic Oscillation. *Hydrology and Earth System Science*, 15: 2581–2597.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E. & Zabalza, J. (2012): Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414–415: 463–475.
- Martínez-Murillo, J.F., Nadal-Romero, E., Regúés, D., Cerdà, A. & Poesen, J. (2013): Soil erosion and hydrology of the western Mediterranean badlands throughout rainfall simulation experiments: A review. *Catena*, 106: 101–112.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A. & Vecchia, A.V. (2005): Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438: 347–350.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos, A. & Llorente-Pinto, J.M. (2010): Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land cover changes: the mountains of Duero river basin (central Spain). *Global and Planetary Change*, 72: 39–49.

- Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I., Ceballos-Barbancho, A., Zabalza, J. & Vicente-Serrano, S.M. (2012): Reservoir management in the Duero basin (Spain): impact on river regimes and the response to environmental change. *Water Resources Management*, 26: 2125–2146.
- Morán-Tejeda E., Herrera S., López-Moreno J.I., Revuelto, J., Lehmann, A. & Beniston, M. (2013): Evolution and frequency (1970-2007) of combined temperature-precipitation modes in the Spanish mountains and sensitivity of snow cover. *Regional Environmental Change*, 13: 873-885.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D. & Serrano-Muela, P. (2010): Respuesta hidrológica en una pequeña cuenca experimental pirenaica con dos ambientes extremos: Cárcavas y bosque de repoblación. *Pirineos*, 165: 135-155.
- Nadal-Romero, E., Lasanta, T., Regüés, D., Lana-Renault, N. & Cerdà, A. (2011): Hydrological response and sediment production under different land cover in abandoned farmland fields in a mediterranean mountain environment. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 55: 303-323+443-448.
- Nadal-Romero, E., Cortesi, N. & González-Hidalgo, J.C. (2014): Weather types, runoff and sediment yield in a Mediterranean mountain landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 427-437.
- Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E.L. *et al.*, (2014): Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 111: 3262-3267.
- Revuelto, J., López-Moreno, J.I., Azorín-Molina, C., Zabalza, J., Arguedas G. & Vicente-Serrano, S.M. (2014): Mapping the annual evolution of snow depth in a small catchment in the Pyrenees using the long-range terrestrial laser scanning. *Journal of Maps*, 10: 379-393.
- Salgueiro, A.R., Machado, M.J., Barriendos, M., Pereira, H.G. & Benito, G., (2013): Flood magnitudes in the Tagus River (Iberian Peninsula) and its stochastic relationship with daily North Atlantic Oscillation since mid-19th Century. *Journal of Hydrology*, 502: 191-201.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., *et al.*, (2014): Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 111: 3245-3250.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R. & Dettinger, M.D. (2005): Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *Journal of Climate*, 18: 1136-1155.
- Trigo, R.M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T.J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. & Esteban-Parra, M.J., (2004): North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24: 925–944.
- Viviroli D., Dürr H. H., Messerli B., Meybeck M. & Weingartner R. (2007): Mountains of the world – water towers for humanity: typology, mapping and global significance. *Water Resources Research*, 43: W07447.

### **Trabajos del profesor José María García Ruiz sobre hidrología ambiental**

- Alatorre L.C., Beguería S. & García-Ruiz J.M. (2010): Regional scale modelling of hill slope sediment delivery: a case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology*, 391: 109–123.
- Alatorre L.C., Beguería S., Lana-Renault N., Navas A. & García-Ruiz J.M. (2012): Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under land use change: using point fall out 137Cs for calibrating a spatially distributed numerical model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 1321–1334.
- Alvera, B. & García-Ruiz, J.M. (2000). Variability of sediment yield from a high mountain catchment, Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32: 478-484.
- Arnáez, J., Martínez Castroviejo, R., Gil, E., Villar, P., Gómez Villar, A. & García Ruiz, J.M., (1994): *El río Ebro en el municipio de Logro-*

- ño. Instituto de Estudios Riojanos, 61 pp., + mapas, Logroño.
- Arnáez, J., Martí Bono, C., Beguería, S., Lorente, A., Errea, M.P. & García Ruiz, J.M., (1999): Factores en la generación de avenidas en una cuenca de campos abandonados, Pirineo Central español. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 25: 7-24.
- Beguería, S., López Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M. & García Ruiz, J.M. (2002): Cambios en las relaciones entre factores climáticos y recursos hídricos en el Pirineo Central español. En *Aportaciones Geográficas en memoria del Prof. L. Miguel Yetano Ruiz* (L.A. Longares Aladrén y J.L. Peña, eds.), Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, pp. 47-54, Zaragoza.
- Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M. & García Ruiz, J.M. (2003): Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32: 283-286.
- Beguería S., Lana-Renault N., Regúés D., Nadal-Romero E., Serrano-Muela P. & García-Ruiz J.M. (2008): Erosion, sediment transport processes in Mediterranean mountain basins. In: *Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources* (eds. Navarro, P.G., Playán, E.): 175-187.
- Beguería S., Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I. & García-Ruiz J.M. (2009): Annual seasonal mapping of peak intensity, magnitude, duration of extreme precipitation events across a climatic gradient, northeast Spain. *International Journal of Climatology*, 29: 1759-1779.
- García Ruiz, J.M., Puigdefábregas, J. & Creus, J. (1980): Influencia de las características físicas de las cuencas hidrográficas en la frecuencia e intensidad de crecidas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 6:19-36.
- García Ruiz, J.M., Puigdefábregas, J. & Martín Ranz, M.C. (1983): Diferencias espaciales en la respuesta hidrológica a las precipitaciones torrenciales de noviembre de 1982 en el Pirineo Central. *Estudios Geográficos*, 170-171: 291-310.
- García Ruiz, J.M. & Arnáez Vadillo, J. (1984a): Infiltration, écoulement sous-superficiel et dynamique des versants dans la Sierra de la Demanda. *Documents d'Ecologie Pyrénéenne*, 3-2: 445-448.
- García Ruiz, J.M. & Arnáez Vadillo, J. (1984b): Tipos de escorrentía y ritmo de evacuación de sedimentos en la Sierra de la Demanda. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10: 17-28.
- García Ruiz, J.M., Puigdefábregas, J. & Creus, J. (1985): *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Instituto de Estudios Altoaragoneses, 224 pp., Huesca.
- García Ruiz, J.M., Puigdefábregas, J. y Creus, J., (1986): La acumulación de nieve en el Pirineo Central y su influencia hidrológica. *Pirineos*, 127: 27-72.
- García Ruiz, J.M. & Martín Ranz, M.C. (1992): *El régimen de los ríos de La Rioja*. Instituto de Estudios Riojanos, 69 pp., Logroño.
- García Ruiz, J.M., González, C., Lasanta, T., Ruiz Flaño, P. & Martí, C. (1994): Monitoring a small experimental basin to study the hydromorphological effects of farmland abandonment. Setting of the problem. En: *Conference on assessment of hydrological temporal variability and changes* (P. Llorens & F. Gallart, eds.), Institut de Ciències de la Terra, 43-52 pp., Barcelona.
- García Ruiz, J.M., Lasanta, T., Martí, C., González, C., White, S., Ortigosa, L. & Ruiz Flaño, P. (1995): Changes in runoff and erosion as a consequence of land-use changes in the Central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20: 301-308.
- García Ruiz, J.M., White, S., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P. & Gómez Villar, A. (1996): *La catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal*. Instituto Pirenaico de Ecología, 54 pp., Zaragoza.
- García Ruiz, J.M. & Gallart, F. (1997): Las cuencas experimentales como base para el estudio de la erosión y la desertificación. En: *El paisaje mediterráneo a través del espacio y*

- del tiempo. Implicaciones en la desertificación* (J.J. Ibáñez, B. Valero Garcés y C. Machado, eds.), Geoforma Ediciones, 221-238 pp., Logroño.
- García Ruiz, J.M., White, S., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P. & Gómez Villar, A. (1997): La catástrofe de Biescas ¿Qué podemos aprender? En *XXXI Curso de Geología Práctica*, (M. Gutiérrez Elorza y A. Menéndez Hevia, eds.), Universidad de Verano de Teruel, pp. 191-208, Teruel.
- García Ruiz, J.M. (1998): La catástrofe de Biescas y la predicción de riesgos. *Actas de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 95: 47-48.
- García Ruiz, J.M. & Lasanta, T. (1998): Improving water resources by means of land management: experiments in mountain areas. *Annales Geophysicae*, 16, suppl. II: C 535.
- García Ruiz, J.M., Arnáez, J., Bordonaba, J. & White, S. (1998a): Uncertainty assessment in the prediction of extreme rainfall events: An example from the Central Spanish Pyrenees. *Annales Geophysicae*, 16, suppl. IV: C 1168.
- García Ruiz, J.M., Arnáez, J., White, S. & Bordonaba, A.P. (1998b): Predicción de eventos extremos en áreas de montaña. El ejemplo del Pirineo Central. En *Investigaciones recientes de la Geomorfología española* (A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch, eds.), Universitat de Barcelona, 623-630 pp., Barcelona.
- García Ruiz, J.M., Martí Bono, C., Arnáez Vadiello, J., Beguería, S., Lorente, A. & Seeger, M., (2000a): Las cuencas experimentales de Arnán y San Salvador en el Pirineo Central español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26: 23-40.
- García Ruiz, J.M., Arnáez, J., White, S., Lorente, A. & Beguería, S. (2000b): Uncertainty assessment in the prediction of extreme rainfall events: an example from the Central Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 14: 887-898.
- García Ruiz, J.M., Beguería, S., López Moreno, J.I., Lorente, A. & Seeger, M., (2001a): *Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente*. Geoforma Ediciones, 192 pp., Logroño.
- García Ruiz, J.M., Beguería, S. & Lorente, A., (2001b): Eventos hidrológicos de baja frecuencia en el Pirineo Central español y sus efectos geomorfológicos. *Serie Geográfica*, 9: 163-176.
- García Ruiz, J.M., White, S., Martí Bono, C., Valero, B., Errea, M.P. & Gómez Villar (2004): La avenida del barranco de Arás y los riesgos hidrológicos en el Pirineo Central español. En *Geografía Física de Aragón, aspectos generales y temáticos* (J.L. Peña, L.A. Longares y M. Sánchez Fabre, eds.), Universidad de Zaragoza: 131-140 pp., Zaragoza.
- García Ruiz, J.M., Lasanta, T., Valero, B., Martí, C., Beguería, S., López Moreno, J.I., Regués, D. y Lana Renault, N., (2005a): Soil erosion and runoff generation related to land use changes in the Pyrenees. En: *Global Change and Mountain Regions: An overview of current knowledge* (U.M. Huber, H.K.M. Bugmann M.A. Reasoner, eds.), Springer, 321-330, Dordrecht.
- García Ruiz, J.M., Arnáez, J., Beguería, S., Seeger, M., Martí-Bono, C., Regués, D., Lana-Renault, N. & White, S., (2005): Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Catena*, 59: 79-92.
- García Ruiz, J.M., Regués, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano Muela, P., Nadal Romero, E., Navas, A., Latron, J., Martí Bono, C. & Arnáez, J. (2008): Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 356: 245-260.
- García-Ruiz, J.M., Lana-Renault, N., Beguería, S., Lasanta, T., Regués, D., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P., López-Moreno, J.I., Alvera, B., Martí-Bono, C. & Alatorre, L.C. (2010a): From plot to regional scales: Interactions of slope and catchment hydrological and geomorphic processes in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 120: 248-257.

- García Ruiz, J.M., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Lana-Renault, N. & Lasanta, T. (2010b): Innovative technology and institutional options in rainfed and irrigated agriculture in the Tagus basin. En: *Integrating water resources management* (G.D. Gooch, A. Rieu-Clarke y P. Stalnake, eds.), Iwa Publishing, 71-80 pp., London.
- García Ruiz, J.M. & Lana-Renault, N. (2011): Una revisión de los efectos hidrológicos y erosivos del abandono de tierras en España. *Geographicalia*, 59-60: 125-135.
- García Ruiz J.M., López-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M., Lasanta T. & Beguería S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Sciences Reviews*, 105: 121–139.
- Lana-Renault, N., Regüés, D., Martí Bono, C., Beguería, S., Latron, J., Nadal, E., Serrano, P. & García Ruiz, J.M. (2007): Temporal variability in the relationships between precipitation, discharge and suspended sediment concentration in a Mediterranean mountain catchment. *Nordic Hydrology*, 38 (2): 139-150.
- Lana-Renault, N., Regüés, D., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P. & García-Ruiz, J.M. (2010a): Streamflow response and sediment yield after farmland abandonment: results from a small experimental catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 165: 97-114.
- Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P., Latron, J., Regüés, D., García-Ruiz, J.M. & Martí-Bono, C. (2010b): Seasonal dynamics of streamflow and sediment transport in three research basins with different land cover. En: *Status and perspectives in small basins* (A. Hermann y S. Schumann, eds.), IAHS Publ., 336: 173-178. ISBN 978-1-907161-08-7.
- Lana-Renault, N., Alvera, B. & García-Ruiz, J.M. (2010c): The snowmelt period in a Mediterranean high mountain catchment: runoff and sediment transport. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36: 99-108.
- Lana-Renault, N., Alvera, B. & García-Ruiz, J.M. (2010d): Producción de agua y sedimentos durante el periodo de fusión nival en alta montaña. En: *Avances de la Geomorfología en España, 2008-2010* (X. Úbeda, D. Vericat y R.J. Batalla, eds.), Sociedad Española de Geomorfología, 131-134 pp., Barcelona.
- Lana-Renault, N., Alvera, B. & García-Ruiz, J.M. (2011): Runoff and sediment transport during the snowmelt period in a Mediterranean high mountain catchment. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 43: 213-222.
- Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, M.P., Sanjuan, Y. & García-Ruiz, J.M. (2014): Comparative analysis of the response of various land covers to an exceptional rainfall event in the central Spanish Pyrenees, October 2012. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 581–592.
- Lasanta, T., Ruiz Flaño, P. & García Ruiz, J.M., (1994): El funcionamiento hidromorfológico de campos abandonados como apoyo a la gestión agroganadera en el Pirineo. *VII Coloquio de Geografía Agraria*: 193-199 pp., Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Lasanta, T., Pérez Rontomé, C., García Ruiz, J.M., Machín, J. & Navas, A. (1995a): Hydrological problems derived from farmland abandonment in semi-arid environments: The Central Ebro Depression. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20: 309-314.
- Lasanta, T., Pérez Rontomé, C., García Ruiz, J.M., Machín, J. & Navas, A. (1995b): Hydrological problems derived from farmland abandonment in semi-arid environments: the central Ebro Depression, Spain. *Annales Geophysicae*, 13: 454.
- Lasanta, T. & García Ruiz, J.M. (1998): La gestión de los usos del suelo como estrategia para mejorar la producción y la calidad del agua. Resultados experimentales en el Pirineo Central español. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 24: 39-57.
- Lasanta, T., García Ruiz, J.M., Pérez Rontomé, M.C. & Errea, M.P. (1998): Repercusiones hidromorfológicas del incremento del barbecho como consecuencia de la política comunitaria del set-aside: resultados en ambiente semiárido de la Depresión del Ebro. *IX Colo-*

- quio de *Geografía Rural*: 297-306 pp., Universidad del País Vasco, Vitoria.
- Lasanta, T., García Ruiz, J.M., Pérez Rontome, C. & Sancho, C. (2000): Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: The effect of land management after farmland abandonment. *Catena*, 38: 265-278.
- Lasanta, T., Beguería, S. & García Ruiz, J.M. (2006): Geomorphic and hydrological effects of traditional shifting agriculture in a Mediterranean mountain, Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 26: 146-152.
- Lasanta Martínez, T., Nadal Romero, E., Serrano Muela, M.P. & García Ruiz, J.M. (2009): La variabilidad en la producción de escorrentía y sedimento en diferentes usos del suelo del Pirineo. En: *Geografía, Territorio y Paisaje: El estado de la cuestión. Actas del XXI Congreso de Geógrafos Españoles* (F. Pillet, M.C. Cañizares y A.R. Ruiz, Coords.), Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, pp. 1803-1815, Cuenca. ISBN: 978-84-8427-721-7.
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, P., Vicente-Serrano, S. & García-Ruiz, J.M. (2010): Escorrentía y erosión tras el abandono de tierras de cultivo en montaña: resultados de la Estación Experimental "Valle de Aisa". *Pirineos*, 165: 115-133.
- Latron, J., Serrano Muela, P., Regüés, D., Lana-Renault, N., Nadal Romero, E, Martí, C. & García Ruiz, J.M. (2008): Respuesta hidrológica en una pequeña cuenca mediterránea forestada (Pirineo central). *Trabajos de Geomorfología en España (2006-2008)* (J. Benavente y F.J. Gracia, eds.), Sociedad Española de Geomorfología, pp.183-186, Cádiz.
- López Bermúdez, F., García Ruiz, J.M., Romero Díaz, A., Ruiz Flaño, P., Martínez Fernández, J. & Lasanta, T. (1993): *Medidas de flujo de agua y sedimentos en parcelas experimentales*. Cuadernos Técnicos de la SEG, Geoforma Ediciones, 38 pp., Logroño.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S. & García-Ruiz, J.M. (2002): Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6: 753-762.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S. & García-Ruiz, J.M. (2003): Efecto de los embalses en el control de avenidas en el Pirineo Central Español. *Geographica*, 44: 57-74.
- López-Moreno, J.I. & García Ruiz, J.M., (2004): Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Hydrological Sciences Journal*, 49: 787-802.
- López Moreno, J.I., Vicente Serrano, S. & García Ruiz, J.M., (2004a): Trends in Pyrenean snowmelt discharges related to evolution of atmospheric circulation modes. *Landschaftökologie un Umweltforschung*, 47: 231-234.
- López Moreno, J.I., Beguería, S. & García Ruiz, J.M., (2004b): Tendencias espacio-temporales en la intensidad de avenidas en el Pirineo Central. En *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología* (G. Benito y A. Díez Herrero, eds.), Sociedad Española de Geomorfología, 69-78 pp., Toledo.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S. & García-Ruiz, J.M. (2004c): The management of a large Mediterranean reservoir: storage regimes of the Yesa reservoir, Upper Aragón River basin, Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 34: 508-515.
- López Moreno, J.I., Beguería, S. & García Ruiz, J.M. (2006): Trends in high flows in the Central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change? *Hydrological Sciences Journal*, 51: 1039-1050.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M. & García-Ruiz, J.M. (2007): Influence of the North Atlantic Oscillation on water resources in central Iberia: Precipitation, streamflow anomalies and reservoir management strategies. *Water Resources Research*, 43: W09411, doi: 10.1029/2007WR005864.
- López-Moreno, J.I., Beniston, M. & García-Ruiz, J.M. (2008): Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, 61: 300-312.
- López Moreno, J.I., Vicente Serrano, S.M., Beguería, S., García Ruiz, J.M., Portela, M.M. & Almei-

- da, A.B. (2009b): Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resources Research*, 45, W02405.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J. & García-Ruiz, J.M. (2011): Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Science*, 15: 311-322.
- López-Moreno, J.I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S.M., Azorin, C., Revuelto, J., Gilaberte, M., García-Ruiz, J.M. & Morán, E. (2014): Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: scenarios in the upper Aragón river, Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment*. En prensa.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M. & Cuadrat, J.M. (2010): The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (Central Spain). *Journal of Hydrology*, 386: 13-26.
- Martín Ranz, M.C. & García Ruiz, J.M., (1984): *Los ríos de La Rioja. Introducción al estudio de su régimen*. Instituto de Estudios Riojanos, 67 pp., Logroño.
- Nadal-Romero, E., Lasanta, T. & García-Ruiz, J.M. (2013): Runoff and sediment yield from land under various uses in a Mediterranean mountain area: long-term results from an experimental station. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38: 346-355.
- Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Latron, J., Serrano, P., Nadal, E., Martí Bono, C. & García Ruiz, J.M. (2006): Procesos hidrológicos y geomorfológicos en un gradiente de cuencas experimentales. En *Geomorfología y Territorio* (A. Pérez Alberti y J. López Bedoya, eds.), Universidade de Santiago de Compostela: 683-695 pp., Santiago de Compostela.
- Ruiz Flaño, P., Lasanta, T. & García Ruiz, J.M., (1992): La variabilidad espacial de la producción de escorrentía y sedimentos como base para la gestión de campos abandonados. En: *Estudios de Geomorfología en España* (F. López Bermúdez, C. Conesa y M.A. Romero, Edrs.). Sociedad Española de Geomorfología: 221-230 pp., Murcia.
- Seeger M., Errea M.P., Beguería S., Arnáez J., Martí C. & García-Ruiz J.M. (2004): Catchment soil moisture, rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288: 299-311.
- Serrano-Muela, M.P., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Regüés, D., Latron, J., Martí-Bono, C. & García-Ruiz, J.M. (2008): Forests and their hydrological effects in Mediterranean mountains. *Mountain Research and Development*, 28: 279-285.
- Serrano-Muela, M.P., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., González-Hidalgo, J.C., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Sanjuán, Y. y García-Ruiz, J.M. (2014): An exceptional rainfall event in the central western Pyrenees: spatial patterns in discharge and impact. *Land Degradation and Development*, DOI: 10.1002/ldr.2221.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F. & Espejo, F. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9: 044001. doi:10.1088/1748-9326/9/4/044001.
- White, S., García Ruiz, J.M., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P. & Gómez Villar, A. (1997): The 1996 Biescas campsite disaster in the Central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. *Hydrological Processes*, 11: 1797-1812.