



RESPUESTA HIDROLÓGICA DEL PIRINEO CENTRAL AL CAMBIO AMBIENTAL PROYECTADO PARA EL SIGLO XXI

Hydrological response of the central Pyrenees to projected environmental change in the 21st century

J.I. López-Moreno^{1*}, S.M. Vicente-Serrano¹, J. Zabalza¹, J. Revuelto¹, M. Gilaberte¹, C. Azorín-Molina¹, E. Morán-Tejeda², J.M. García-Ruiz¹ & C. Tague³

¹ Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC. Avda Montañana 1005. 50.059 Zaragoza, España

² C3I-Climate Change and Climate Impacts Unit, University Geneva. Bâtiment-D. Carouge, Geneva, Switzerland

³ University of Santa Barbara, Bren School of Environmental Science & Management. California, US.

* nlopez@ipe.csic.es

Recibido: 07-02-2014. **Aceptado:** 04-03-2014. **Fecha de publicación on-line:** 24-09-2014

Citation / Cómo citar este artículo: López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J. M. & Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos*, 169, e004. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169004>

RESUMEN: Se han simulado los caudales de cinco cabeceras de ríos en los Pirineos centrales españoles, considerando diferentes escenarios de cambio climático y de uso del suelo. Los caudales fueron simulados utilizando el modelo hidro-ecológico RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System). Los resultados muestran que los cambios proyectados por un conjunto de modelos climáticos regionales en precipitaciones y temperaturas en el siglo XXI podrían causar una disminución del caudal anual entre el 13% y el 23%, dependiendo de la cuenca considerada. Cuando se añade a los efectos del cambio climático el efecto del aumento de la cubierta forestal en las cuencas, la disminución de los caudales anuales oscila entre el 19% y el 32%, dependiendo de la cuenca estudiada. Los mayores cambios hidrológicos se producirían a principios de primavera, verano y otoño, cuando la disminución puede superar el 40% respecto a los valores actuales. El invierno es la estación menos afectada como consecuencia del aumento de la escorrentía debido a una reducción del agua acumulada en forma de nieve y a un inicio más temprano de su fusión, así como por que durante los meses fríos el consumo de agua por parte de la vegetación es menor. La magnitud del cambio hidrológico, resultado de los escenarios de cambio ambiental, puede afectar seriamente a la gestión de los recursos hídricos y a las comunidades vegetales del Pirineo central, así como a la disponibilidad de agua en el conjunto de la cuenca del Ebro.

PALABRAS CLAVE: Caudales; cambio climático; cambio de usos del suelo; recursos hídricos; modelo hidro-ecológico RHESSys; Pirineos; montaña mediterránea

ABSTRACT: Streamflows in five Mediterranean mountain headwaters in the central Spanish Pyrenees were projected under various climate and land use change scenarios. Streamflows were simulated using the Regional Hydro-Ecologic Simulation System (RHESSys). The results show that changes in precipitation and temperature could cause a decline of annual streamflow between 13% and 23%, depending on the considered catchment. When the effect of increased forest cover in the basins is added to climate change effects, the decrease in annual streamflow is enhanced up to 19%

and 32%. The largest hydrological changes resulting from environmental change are projected mainly in early spring, summer and autumn, when the decline may exceed 40%. Winter is the least affected season by environmental change because of increased runoff as a consequence of reduced storage of water in the snowpack and an earlier onset of the snowmelt, and the lower consumption of water by vegetation during the cold season. The magnitude of hydrological change as a result of the assumed environmental change scenarios may lead to serious impacts on water management and ecology of the studied region, as well as the water availability in the Ebro basin.

KEYWORDS: Streamflow; climate change; land uses change; water resources; RHESys hydro-ecological model; Pyrenees; Mediterranean mountains

1. Introducción

Las montañas mediterráneas juegan un papel clave en la producción de escorrentía y suministro de recursos hídricos aguas abajo (Viviroli *et al.*, 2007; García-Ruiz *et al.*, 2011). Los Pirineos son un buen ejemplo, pues en sus cabeceras se produce más de un 50% de los caudales de la Cuenca del Ebro, y la regulación de sus ríos es fundamental para asegurar el suministro de agua para la agricultura, la generación de energía y el uso urbano e industrial en las zonas más áridas situadas en la Depresión del Ebro y cerca de su desembocadura (Batalla *et al.*, 2004; López & Justribo, 2010; López-Moreno *et al.*, 2011a). En los últimos años, científicos y gestores del agua han mostrado su preocupación por un importante descenso de los caudales en los sectores de cabecera de los ríos (García-Ruiz *et al.*, 2011). Dicho descenso se debe fundamentalmente a cambios recientes en las condiciones climáticas y a un importante incremento de la vegetación. Así, la temperatura ha mostrado un aumento significativo (El-Kenawy *et al.*, 2011), y la precipitación ha descendido, si bien con una intensidad moderada, que no siempre es estadísticamente significativa (López-Moreno *et al.*, 2010). Además, la cantidad de nieve acumulada y su duración han disminuido en las últimas décadas (López-Moreno 2005), causando cambios en los regímenes fluviales de los ríos pirenaicos, con un ligero incremento de los caudales relativos invernales y un pico primaveral más temprano y menos intenso (López-Moreno & García-Ruiz, 2004). Por otra parte, el abandono de campos de cultivo a lo largo del siglo XX y su posterior recolonización vegetal, bien natural o acelerada por repoblaciones forestales, ha sido uno de los elementos del cambio global más llamativo que ha sucedido en la montaña Mediterránea, incluidos los Pirineos (García-Ruiz & Lana-Renault, 2011). Los resultados de éstos cambios ambientales han sido un descenso significativo de los caudales (Beguería *et al.*, 2003; Gallart & Llorens, 2003; López-Moreno *et al.*, 2008a) y los coeficientes de escorrentía (Lasanta *et al.*, 2000; López-Moreno *et al.*, 2011a), que ya han obligado a los gestores a modificar los patrones de gestión de los embalses y a limitar el agua desembalsada a los ríos aguas abajo de sus presas (López-Moreno *et al.*, 2004 y 2008a).

Las perspectivas para el futuro indican que las tendencias observadas en las últimas décadas pueden continuar e incluso acelerarse, pues en las montañas Medi-

terráneas el cambio climático puede afectar de forma muy intensa (López-Moreno *et al.*, 2008b; Nogués-Bravo *et al.*, 2008), y los caudales pueden disminuir de forma muy significativa (Milly *et al.*, 2005; Nohara *et al.*, 2006). Algunos estudios ya han indicado que diversos escenarios de cambio climático apuntan a un descenso importante de los caudales pirenaicos en las próximas décadas (García-Vera, 2013; López-Moreno *et al.*, en prensa). Además, los procesos de revegetación están lejos de terminar, pues todavía hay amplias zonas de campos abandonados donde el proceso de revegetación está lejos de haber concluido (Quiñonero-Rubio *et al.*, 2013); y el incremento de la temperatura, junto a un descenso en la presión ganadera, pueden llevar a una progresiva colonización del bosque en el piso subalpino (López-Moreno *et al.*, 2008a).

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de un modelo eco-hidrológico para simular los caudales bajo condiciones observadas y diversos escenarios de cambio climático y de revegetación en las próximas décadas (periodo 2021-2050) en las principales cabeceras de los ríos de Pirineo Aragonés (ríos Aragón, Gállego, Cinca, Ésera y Noguera Ribagorzana). De esta forma se puede valorar el efecto por separado, y de forma conjunta, del cambio climático y de los usos del suelo sobre la producción de escorrentía, así como las diferencias en la respuesta al cambio ambiental simulado de cuencas muy cercanas entre sí, pero con diferencias significativas en su tamaño, altitud, características geológicas y condiciones climáticas dominantes.

2. Zona de estudio

El área de estudio comprende el sector central de la vertiente sur de los Pirineos, abarcando desde la cabecera del río Aragón al oeste, hasta la cuenca del río Noguera Ribagorzana al este, incluyendo las cabeceras de los ríos Gállego, Ara, Cinca y Ésera (Figura 1). La altitud oscila entre 700 m y más de 3.000 m sobre el nivel del mar. El clima en esta región presenta una transición desde marcadas influencias atlánticas en la cuenca más occidental hasta matices más continentales con rasgos mediterráneos hacia el este. Por otro lado, los efectos topográficos originados por el macrorrelieve modulan fuertemente la distribución de la precipitación y la temperatura. En los tramos situados a menor altitud de la zona de estudio, la precipitación media anual es de aproximada-

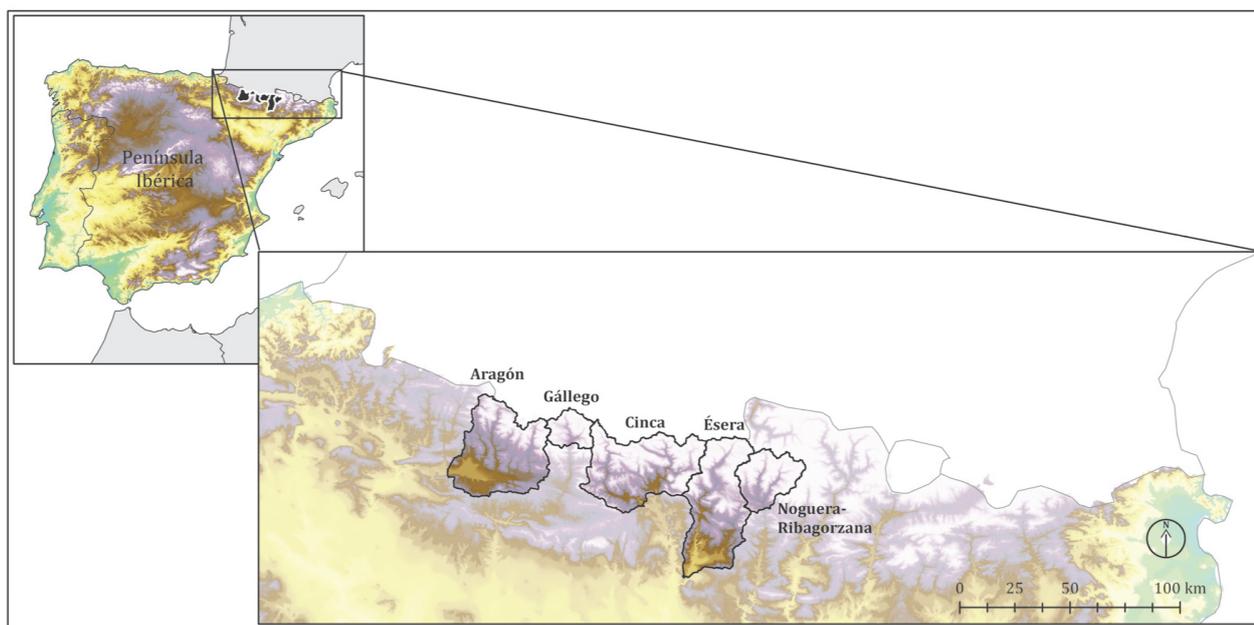


Figura 1: Zona de estudio.

Figure 1: Study area.

mente 700 mm y la temperatura media anual oscila entre 10 y 11°C. En las zonas más elevadas, la precipitación anual supera normalmente los 1.200 mm y, a veces, se exceden los 2.000 mm. El efecto Föhn es frecuente en la zona, acentuando las diferencias de precipitación entre las vertientes norte y sur, e incrementando la temperatura en las laderas meridionales. La mayor parte de la precipitación anual se produce durante el invierno en las zonas con mayor influencia atlántica, y durante la primavera y el otoño en los sectores más continentales y con influencias mediterráneas. Los veranos son generalmente secos, produciéndose la mayor parte de la precipitación con eventos de carácter convectivo. La isoterma anual de 0°C se encuentra alrededor de 2730m s.n.m. Durante la estación fría (noviembre-abril), la mayor parte de la precipitación se produce en forma de nieve por encima de 1600 m s.n.m., dando lugar a importantes acumulaciones, y a la existencia de un marcado pico de caudal en los meses de mayo y junio (López-Moreno & García-Ruiz, 2004).

3. Datos y métodos

3.1. Datos utilizados

Para este trabajo se dispuso de información diaria de precipitación y temperatura en 40 y 25 estaciones meteorológicas, respectivamente, ubicadas en las cuencas analizadas entre 1975 y 2006. Los datos son recogidos y gestionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estos datos se sometieron a un riguroso proceso de control de calidad, reconstrucción de series y análisis de homogeneidad (Vicente-Serrano *et al.*,

2010; El Kenawy *et al.*, 2012). Los datos hidrológicos, utilizados para la calibración y la validación del modelo, han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Ebro, y fueron sometidos igualmente a un proceso de control de calidad para eliminar datos anómalos y detectar inhomogeneidades en las series temporales. Los datos ausentes se rellenaron a partir de series cercanas y altamente correlacionadas (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2012).

La información sobre los usos del suelo se basa en los inventarios forestales de vegetación de los años 1986, 1997 y 2007. Las clases de vegetación originales se reclassificaron en 8 categorías: pastizales, bosque caducifolio, bosque de coníferas, bosque de quercíneas, matorrales, suelo desnudo, superficie agrícola, áreas urbanas, y láminas de agua.

Los tipos de suelo se obtuvieron de la base de datos europea del suelo (Joint Research Center, <http://eu-soils.jrc.ec.europa.eu/>) a una escala espacial de 1 km²; los datos incluyen información sobre los tipos de suelo y los parámetros del suelo que requiere el modelo RHESSys (textura, densidad aparente y contenido de materia orgánica). Otros parámetros necesarios (capacidad de campo, conductividad hidráulica y decaimiento de la capacidad hidráulica saturada) se obtuvieron de la literatura disponible (Stanhill, 1970; Wösten *et al.*, 1999; Jones *et al.*, 2004 y 2005; Cho *et al.*, 2012).

3.2. Escenarios de cambio climático y de usos del suelo

La temperatura y la precipitación simulada por modelos climáticos regionales (RCMs) para un período de control (1970-2000) y un período futuro (2021-2050)

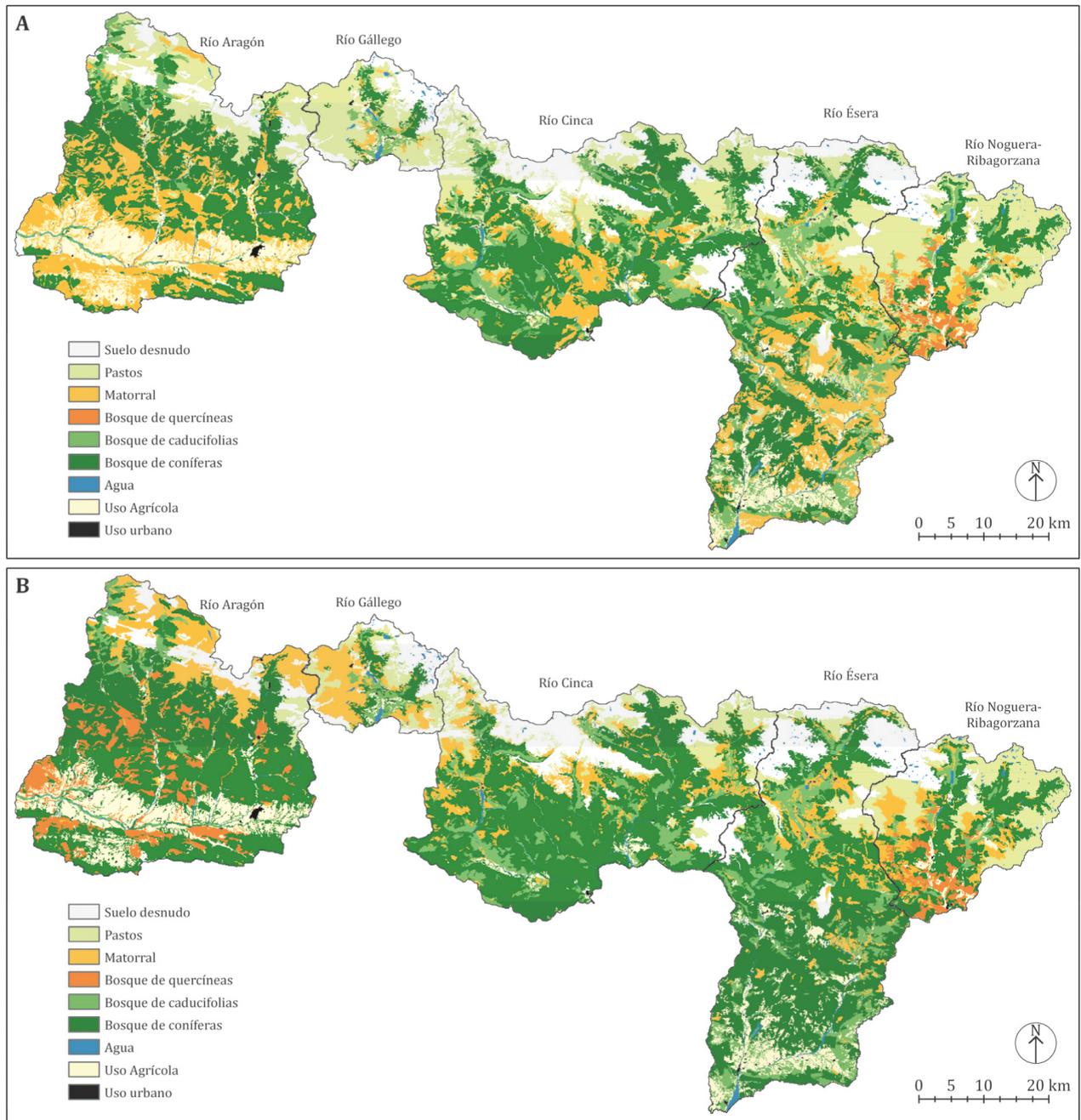


Figura 2: Mapas de usos de suelo utilizados para el periodo control (A) y proyección para el futuro que asume diversos procesos de revegetación.

Figure 2: Land use maps used for the control period (A) and the scenario of afforestation for the future.

se obtuvieron de la base de datos del proyecto ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>). Incluyen simulaciones continuas del clima para el periodo 1950-2100 a una elevada resolución espacial (celdas a 25 km²) para un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A1B, que contempla un incremento moderado de dichas emisiones (Nakicenovic *et al.*, 1998). Los modelos utilizados en este trabajo fueron: C4I (HadCM3Q16); CNRM (ARPEGE); DMI (ECHAM5-r3); ETHZ (HadCM3Q0); GKSS (IPSL); HC (HadCM3Q0); ICTP

(ECHAM5-r3); KNMI (ECHAM5-r3); METNO (HadCM3Q20); MPI (ECHAM5-r3); SMHI (HadCM3Q3); y VMGO (HadCM3Q0). Los RCMs han mostrado una buena capacidad para reproducir la precipitación y la temperatura observada en el Pirineo durante el periodo control. En general, los errores en la temperatura oscilan entre 1 y 1,5 °C y entre un 10 y 25% para la precipitación (López-Moreno *et al.*, 2008a).

Se utilizaron dos escenarios de usos del suelo para las simulaciones hidrológicas (Fig. 2 y Tabla 1). En el

Tabla 1: Superficie de cada cuenca ocupada por los distintos usos de suelo considerados para el periodo actual, el escenario de revegetación y la diferencia (%) entre ambos.

Table 1: Surface of each basin under different land uses for the control period, the revegetation scenario and their differences (%).

		Río Aragón	Río Gállego	Río Cinca	Río Ésera	Río Noguera-Ribagorzana
Usos de suelo actuales	B. de caducifolias	4.0	7.1	8.2	15.4	5.6
	B. de coníferas	36.5	10.7	39.8	30.4	22.5
	B. de quercíneas	10.3	--	--	--	8.7
	Pastos	13.3	49.6	22.1	4.9	43.3
	Matorral	14.3	4.1	9.9	7.2	8.5
Usos de suelo proyectados	B. de caducifolias	3.9	7.0	8.2	15.4	5.6
	B. de coníferas	51.4	14.7	49.7	50.3	31.1
	B. de quercíneas	10.4	--	--	--	8.7
	Pastos	1.4	19.9	12.1	12.1	28.9
	Matorral	11.7	29.7	10.0	19.7	14.4
Diferencia (%)	B. de caducifolias	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0
	B. de coníferas	14.8	4.0	9.9	19.7	8.6
	B. de quercíneas	0.1	--	--	--	0.0
	Pastos	-11.9	-29.7	-10.0	7.2	-14.4
	Matorral	-2.6	25.6	0.0	12.5	5.9

primer escenario los usos del suelo se mantuvieron sin cambios durante las próximas décadas (Figura 2A). El segundo escenario se basa en una posible evolución de la cubierta vegetal, asumiendo que las áreas actualmente cubiertas por matorrales evolucionarán hacia bosques de coníferas, como se ha venido observando en los campos abandonados desde hace varias décadas (Lasanta *et al.*, 2005). Este escenario también asume un incremento altitudinal del límite del bosque (2000 m s.n.m), resultado de un posible descenso de la presión ganadera (O'Flanagan *et al.*, 2011), y que puede verse facilitado por temperaturas cada vez más cálidas. Como se puede observar en la Tabla 1, según el proceso de revegetación asumido en este estudio, las cuencas de los ríos Aragón y Ésera serían las que registrarían una mayor expansión de los bosques de coníferas (14.8 y 19.7%, respectivamente), mientras que la cuenca del río Gállego experimentaría el mayor incremento del área ocupada por matorral, fundamentalmente en la zona de pastos subalpinos.

3.3. El modelo RHESSys

RHESSys es un modelo hidro-ecológico diseñado para simular el ciclo del agua, del carbono y de los nutrientes sobre terreno complejo, a escalas de análisis pequeñas y medianas (Tague & Band, 2004). Los procesos que puede simular son los flujos verticales de humedad (intercepción, transpiración, evapotranspiración y recarga subterráneas), y los flujos laterales entre las distintas unidades espaciales (Band *et al.*, 2000). Las cuencas se subdividen mediante una organización jerárquica entre las unidades de paisaje, lo que permite que los distintos procesos puedan ser simulados a distintas escalas (Tague & Band, 2004). Los distintos niveles espaciales comprenden unidades progresivamente más pequeñas. Cada nivel espacial está asociado con diferen-

tes procesos modelizados por RHESSys. Este procedimiento permite una parametrización eficiente y reducir el error asociado con la fragmentación del paisaje (Band *et al.*, 1993; Lammers *et al.*, 1997).

La calibración de los cuatro parámetros necesarios se hizo mediante un proceso de simulación de Monte-Carlo: i) el decaimiento de la conductividad hidráulica con la profundidad (m); ii) la conductividad hidráulica en suelos saturados (K); iii) la infiltración a través de macroporos (gw1); y iv) la conectividad lateral de las laderas con el canal principal (GW2). El periodo de 1996-2006 se utilizó para calibrar el modelo, mientras que el periodo de 1975-1995 se utilizó para su validación. El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la relación entre la media del error estándar y del cuadrado desviación (índice de RSR) se utilizó para cuantificar la capacidad del modelo para reproducir de manera adecuada los caudales mensuales observados. La formulación matemática de los tres índices, así como la escala de los mismos, se describen en Moriasi *et al.* (2007). Una vez confirmada la calidad de las simulaciones hidrológicas para el periodo observado en todas las cuencas objeto de estudio, se repitieron las simulaciones a escala diaria, siendo luego convertidas a valores medios mensuales, asumiendo los cambios en el clima y las proyecciones de usos de suelo definidas anteriormente. Las series observadas de temperatura y precipitación se modificaron utilizando valores de cambio medio mensual de cada cuenca, obtenidos a partir de la comparación de los datos climáticos simulados para el periodo proyectado (2020-2050) y para el periodo control (1970-2000). Por lo tanto, nuevas simulaciones se realizaron utilizando los parámetros calibrados para el periodo 1996-2006, pero introduciendo las series climáticas modificadas según las proyecciones de los RCMs en combinación con los dos escenarios de usos del suelo: condiciones inalteradas desde el periodo de

control (1), y las cuencas sometidas a un proceso de revegetación (2).

4. Resultados

4.1. Proyecciones de cambio climático en las cuencas analizadas

La Figura 3 muestra el cambio proyectado (promedio de los modelos regionales utilizados) en la precipitación y la temperatura anual y estacional en las cuencas de los ríos Aragón, Gállego, Cinca, Ésera y Noguera Ribagorzana. La señal de cambio en precipitación y temperatura es prácticamente idéntica en las cinco cuencas estudiadas. El promedio entre modelos indica un aumento generalizado de la temperatura para el período 2021-2050 con respecto al período de control (1970-2000). Se espera que el calentamiento pueda oscilar entre 1,5 °C en invierno y primavera, y casi 2,5 °C en verano, con un calentamiento medio anual próximo a 1,8 °C. Los modelos climáticos indican un descenso de la precipitación anual próximo al 10% respecto al período de control, con una mayor disminución en verano (próxima al 18%) y menor en invierno (menor al 5%).

4.2. Simulación de los caudales durante el periodo de control

La Figura 4 muestra los caudales mensuales observados y simulados en las cinco cuencas simuladas para el período de validación. La Tabla 2 muestra los estimadores de error correspondientes (NS, PBIAS y RSR) obtenidos para el período de validación. A pesar de algunas discrepancias entre los valores observados y simulados, en particular una sobreestimación de los picos más elevados de caudal, RHESys reproduce adecuadamente los ciclos estacionales más característicos y la variabilidad interanual de los caudales de las cinco cuencas estudiadas. En general, los estimadores de error de la tabla 2 indican que las simulaciones de las cinco cuencas pueden considerarse “buenas” o “muy buenas”, sobre la base de la escala indicada en Moriasi *et al.* (2007). Los valores de NSE fueron mayores de 0,6; el PBIAS no excedió un 15% y el RSR fue menor de 0,5.

Tabla 2: Indicadores de error obtenidos para el periodo de validación.

Table 2: Error indicators obtained for the validation period.

	VALIDACIÓN		
	NSE	RSR	PBIAS
Aragón	0.61	0.09	-0.05
Gállego	0.62	0.23	3.43
Cinca	0.61	0.25	14.7
Ésera	0.67	0.12	7.9
Noguera-Ribagorzana	0.64	0.16	5.32

4.3. Cambios de caudal bajo los escenarios de cambio climático y usos del suelo

La Figura 5 muestra el régimen de caudales promedio mensual simulado por el modelo RHESys bajo el escenario promedio de cambio climático proyectado por los diversos modelos climáticos considerados, y el efecto conjunto del cambio climático y el escenario de revegetación. Considerando únicamente los cambios en el clima, los modelos indican una disminución de la escorrentía anual de entre un 13% y un 23%, según la cuenca considerada para el período 2021-2050. La cuenca del río Gállego sería la menos afectada por el cambio climático, mientras que la cuenca del río Ésera mostraría la mayor magnitud de cambio. En general, los modelos muestran un mayor descenso en primavera y verano, particularmente en mayo, cuando el descenso es cercano al 30%. Destaca en todos los casos una clara reducción del pico primaveral, que deja de ser el pico principal del año, pasando a un régimen pluvio-nival con dos picos de caudal en otoño y primavera. El caudal de noviembre a febrero es el menos afectado por las proyecciones de cambio climático, mostrando una disminución de caudales menor al 10%, y en algunos casos incluso se muestra un claro incremento, como sucede en el río Gállego y en el Noguera Ribagorzana.

El efecto conjunto del cambio climático y el escenario de revegetación lleva al descenso del caudal anual que oscila entre el 19% y 32%, dependiendo de la cuenca considerada. De nuevo, las cuencas de los ríos Ésera y Gállego son las que mayor y menor cambio hidrológico muestran, respectivamente. Las consecuencias del cambio ambiental sobre los caudales se observan de forma muy notable desde marzo hasta diciembre, siendo el descenso particularmente importante en verano y otoño, cuando puede superar el 40%. Únicamente en enero y febrero la reducción muestra una baja magnitud.

5. Discusión y conclusiones

Este trabajo muestra cómo los cambios ambientales proyectados a medio plazo, incluyendo cambios en el clima y en la cubierta vegetal, pueden modificar de forma importante la hidrología de las cabeceras de los ríos pirenaicos. En todas las cuencas analizadas, los modelos climáticos predicen un notable aumento de las temperaturas (1-2 °C), incluso para un horizonte relativamente próximo (2021-2050), y considerando un escenario de emisión de gases de efecto invernadero relativamente moderado (A1B). La evolución de la precipitación está sujeta a una mayor incertidumbre, pero casi todos los modelos indican una suave disminución de sus valores anuales, con un descenso más acusado en verano, y valores muy similares para el invierno. Los modelos indican que el mayor calentamiento se producirá en verano, mientras que las temperaturas de invierno serán las menos afectadas. Las proyecciones obtenidas para las cuencas pirenaicas son bastante similares a las obtenidas

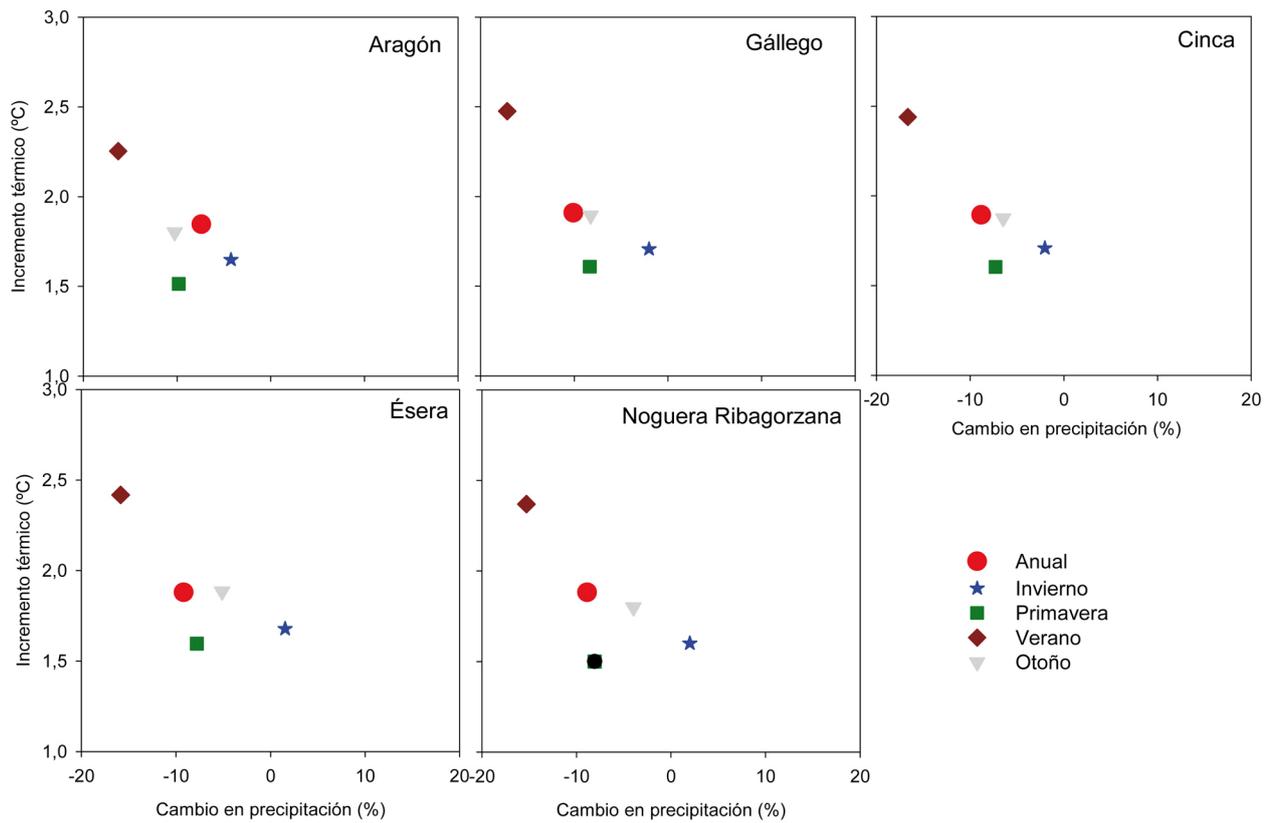


Figura 3: Cambio proyectado para el periodo 2020-2050 en la precipitación y temperatura anual y estacional (promedio de los modelos regionales utilizados) en las cinco cuencas estudiadas.

Figure 3: Projected annual and seasonal changes in precipitation and temperature (inter-model average) for the five studied basins

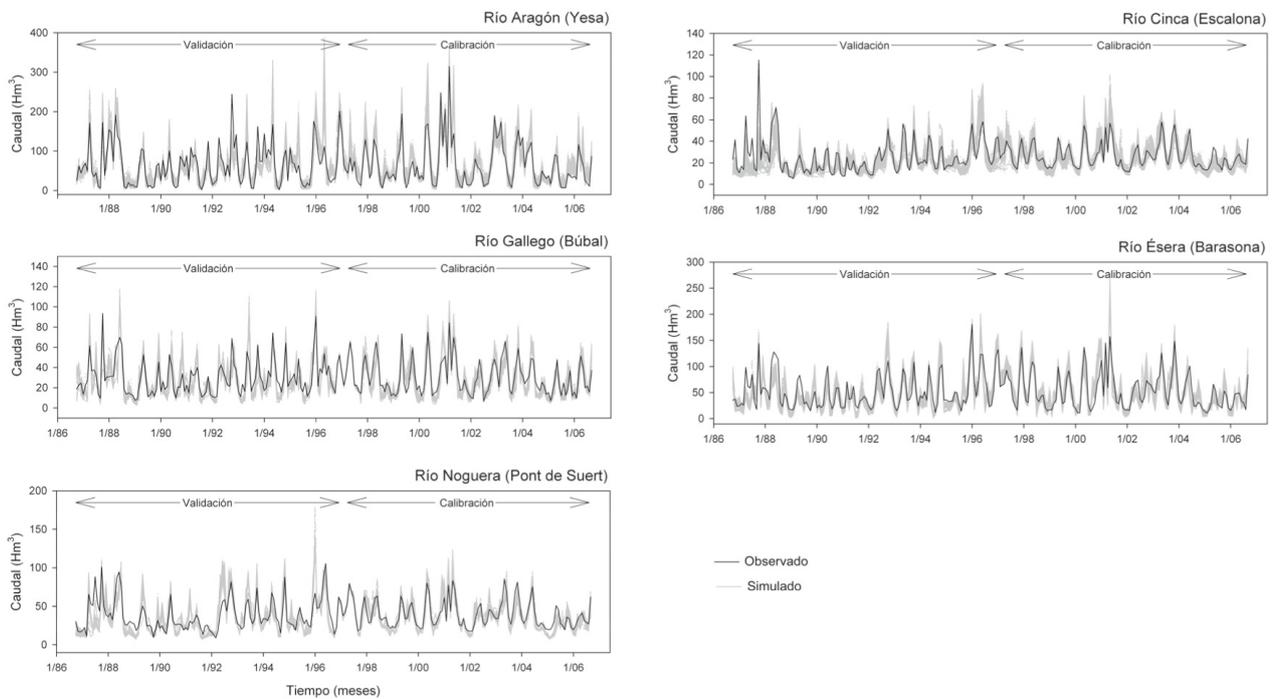


Figura 4: Caudales mensuales observados y simulados durante los periodos de validación y calibración.

Figure 4: Observed and simulated monthly runoff during validation and calibration periods.

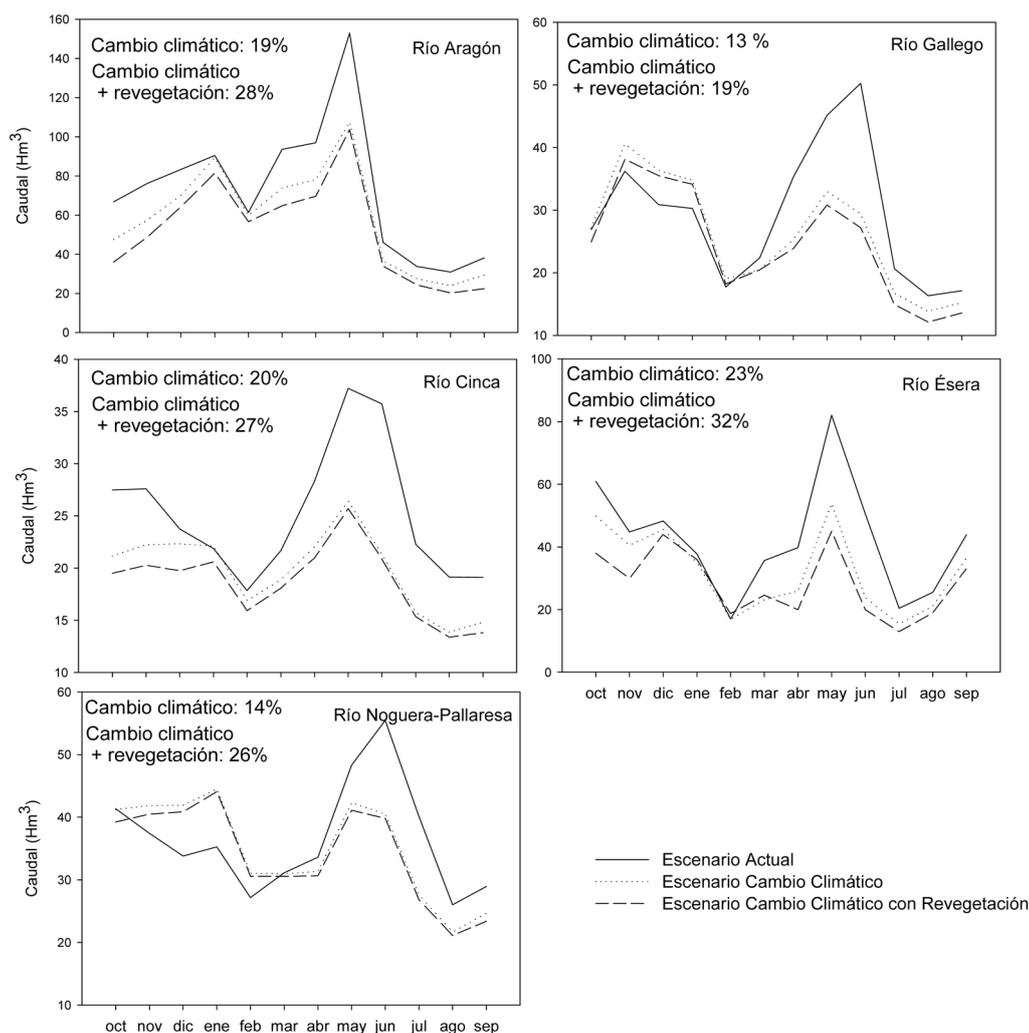


Figura 5: Caudal simulado bajo condiciones ambientales actuales, asumiendo cambio climático y el efecto combinado del cambio climático y los usos del suelo.

Figure 5: Simulated runoff under observed environmental conditions, assuming climate change, and combined effect of climate and land use changes.

en estudios previos sobre el cambio climático en otras zonas de montaña Mediterránea (Nogués-Bravo *et al.*, 2008; García-Ruiz *et al.*, 2011; López-Moreno *et al.*, 2011b).

Si se atiende únicamente al cambio climático, el caudal anual de las cuencas estudiadas descendería entre un 13% y un 23% según los casos analizados, valores que resultan coherentes con el descenso del 19% indicado por García-Vera (2013) para zonas de cabecera del valle del Ebro para el periodo 2040-2070, también considerando el escenario A1B. Las diferencias en la magnitud de cambio entre las cuencas analizadas se deben a diferencias en su hipsometría, litología, tipo y espesor de los suelos y en la cubierta vegetal, que pueden afectar a la respuesta hidrológica frente a alteraciones climáticas (López-Moreno *et al.*, 2011a).

El aumento de la vegetación en las cabeceras de las montañas mediterráneas está lejos de haber finalizado (García-Ruiz & Lana-Renault, 2011). Está demostrado

que la expansión de los bosques y matorrales reduce la escorrentía (Weatherhead & Howden, 2009; Warburton *et al.*, 2012), especialmente en las zonas de cabecera de los ríos. Sin embargo, el impacto del cambio en la cobertura vegetal sobre la respuesta hidrológica depende de las características físicas de la cuenca (tipo de suelo, altitud, etc.), el tipo de vegetación, la intensidad de las precipitaciones y los efectos de escala (Bunte & MacDonald, 1995; Andréassian, 2004; Calder, 2007; Nadal Romero *et al.*, 2012; Quiñonero-Rubio *et al.*, 2013). En este estudio las simulaciones hidrológicas también se llevaron a cabo utilizando la hipótesis de que las áreas actualmente cubiertas por matorral pueden evolucionar hacia bosque, y que los prados subalpinos pueden ir recolonizándose por formaciones arbustivas (García-Ruiz *et al.*, 2011). Si sumamos el efecto del incremento de la vegetación asumido en este trabajo a los cambios derivados del incremento de la temperatura y de los usos del suelo, se espera un descenso de caudales que oscila

entre el 19% y el 32%, dependiendo de la cuenca analizada. Estacionalmente, los cambios en la cubierta vegetal afectan con mayor intensidad a los caudales de finales del invierno y principios de la primavera (principalmente de marzo), y en otoño. A mitad de la primavera, la cantidad de agua consumida por la vegetación es alta, pero representa un porcentaje menor que en meses precedentes. En invierno, el efecto de la revegetación es menor porque la cantidad de agua consumida disminuye al tratarse de un periodo de latencia para la vegetación y su consumo de agua es mucho menor. En verano, el consumo de agua por parte de la vegetación disminuye debido al bajo nivel de disponibilidad de agua en el suelo, a lo que la vegetación se adapta anatómicamente y fisiológicamente (Chávez *et al.*, 2003). El cambio en las variables climáticas produce un descenso de los picos de caudal primaverales como consecuencia de una menor acumulación de nieve y una fusión más temprana (López-Moreno & García-Ruiz, 2004; Christensen & Lettenmaier, 2007; Barnett *et al.*, 2008; Dawadi & Ahmad, 2012), lo que acentúa los estiajes estivales. Las simulaciones del clima y el cambio en la cubierta vegetal combinados indican una disminución sostenida de la escurrentía desde el final del invierno hasta el final del otoño, con disminuciones de los caudales en torno al 30-40% respecto a los valores observados en las últimas décadas. El invierno es la única estación que muestra cambios hidrológicos mucho más moderados, o incluso un incremento de los caudales en algunas de las cuencas estudiadas.

La magnitud del cambio hidrológico simulado en las cabeceras pirenaicas es suficiente para alterar de forma muy notable los patrones de gestión de los recursos hídricos del Pirineo, afectando a la disponibilidad de agua en el conjunto de la cuenca del Ebro (López-Moreno *et al.*, 2008a). De hecho, la magnitud del cambio proyectado para el periodo 2021-2050 resulta muy similar al ya observado en el Pirineo a lo largo de la segunda mitad del siglo XX (Beguiría *et al.*, 2003), que obligó a los gestores de agua a introducir importantes modificaciones en los patrones de llenado y vaciado de los embalses (López-Moreno *et al.*, 2004). Estos resultados confirman la necesidad de profundizar más en el efecto combinado del clima y los usos de suelo de cara a desarrollar escenarios fiables de la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro (Parajuli, 2010; Tong *et al.*, 2012), que incluyan la incertidumbre de los modelos climáticos y la de los modelos hidrológicos, además de los esquemas de gestión de agua existentes en cada una de las cuencas, más allá de analizar la respuesta hidrológica exclusivamente bajo condiciones naturales.

Agradecimientos

Agradecemos a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) por proporcionar las bases de datos utilizadas en este estudio. Este trabajo recibió el apoyo de los proyec-

tos de investigación CGL2011-27536, CGL2011-27753-CO2-01 y CGL2011-27574-CO2-02, financiados por la comisión de Ciencia y Tecnología y FEDER, "Demonstration and validation of innovative methodology for regional climate change adaptation in the Mediterranean area (LIFE MEDACC)" financiado por el programa LIFE de la Comisión Europea, y CTP1/12 "Creación de un modelo de alta resolución espacial para cuantificar la esquiabilidad y la afluencia turística en el Pirineo bajo distintos escenarios de cambio climático", financiado por la Comunidad de Trabajo de los Pirineos.

Referencias

- Andréassian V., 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 29(1): 1-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- Band, L.E., Patterson, P., Nemani, R. & Running, S.W., 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63: 93-126. doi.org/10.1016/0168-1923(93)90024-C
- Band, L.E., Tague, C., Brun, S., Tenenbaum, D. & Fernandes, R., 2000. Modelling watersheds as spatial object hierarchies: structure and dynamics. *Transactions in GIS*, 4(3): 181-196. <http://dx.doi.org/10.1111/1467-9671.00048>
- Barnett, T.P., Pierce, D.W., Hidalgo, H.G., Bonfils, C., Santer, B.D., Das, T., Bala, G., Wood, A.W., Nozawa, T., Mirin, A.A., Cayan, D.R. & Dettinger, M. D., 2008. Human-induced changes in the hydrology of the Western United States. *Science*, 319: 1080-1083. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1152538>
- Batalla, R.J., Gómez, C.M. & Kondolf, M., 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290: 117-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.002>
- Beguiría, S., López-Moreno, J.I., 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 (4): 283-286.
- Bunte, K. & MacDonald, L.H., 1995. Detecting changes in sediment loads: where and how is it possible. En: Osterkamp, W. (Ed.) *Effects of scale on interpretation and management of sediment and water quality*. International Association of Hydrologic Sciences, Publication 226.
- Calder, I.R., 2007. Forests and water—ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*, 251: 110–120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015>
- Chaves, M.M., Maroco, J.P. & Pereira, J.S., 2003. Understanding plant responses to drought-From genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3): 239-264. <http://dx.doi.org/10.1071/FP02076>
- Cho, J., Myazaki, S., Yeh, P., Kim, W., Kanae, S. & Oki, T., 2012. Testing the hypothesis on the relationship between aerodynamic roughness length and albedo using vegetation structure parameters. *International Journal of Biometeorology*, 56: 411–418. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-011-0445-2>
- Christensen, N.S. & Lettenmaier, D.P., 2007. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4): 1417-1434. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1417-2007>
- Dawadi, S. & Ahmad, S., 2012. Changing Climatic Conditions in the Colorado River Basin: Implications for Water Resources Management. *Journal of Hydrology*, 430–431: 127–141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.010>
- El Kenawy, A., López-Moreno, J.I. & Vicente-Serrano, S. M., 2011. Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain: 1960-2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 1-21. doi:10.5194/nhess-11-2583-2011

- El Kenawy, A., López-Moreno, J.I. & Vicente-Serrano, S.M., 2012. Trend and variability of temperature in Northeastern Spain (1920-2006): linkage to atmospheric circulation. *Atmospheric Research*, 106: 159-180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.12.006>
- Gallart, F. & Llorens, P., 2003. Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29: 769-773. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2004.05.004>
- García-Ruiz, J.M. & Lana-Renault, N., 2011. Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region – A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140 (3-4): 317-338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>
- 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 Science Reviews*, 105 (3-4): 121-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>
- García-Vera M.A., 2013. The application of hydrological planning as a climate change adaptation tool in the Ebro basin. *Water Resources Development*, 29 (2): 219-236. <http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2012.747128>
- Jones, R.J.A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P.J. & Montanarella, L., 2004. *The map of organic in top soils in Europe*. Special Publication Ispra, 72 pp (S.P.I.04.72). European Soil Bureau Research Report No. 17, EUR 21209 EN, 26pp. and 1 map in ISO B1 format. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- Jones, R.J.A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P.J. & Montanarella, L., 2005. Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science*, 56(5): 655 – 671. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00728.x>
- Lammers, R., Band, L. & Tague, C., 1997. Scaling behaviour in watershed processes. En: Vangardingen, P., Foodyand, G. & Curran, P. (Eds.) *Scaling – up*, Cambridge University Press, pp. 295-318.
- Lasanta, T., García-Ruiz, J.M., Pérez-Rontomé, C. & Sancho-Marcén, C., 2000. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *Catena*, 38: 265-278. [http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00079-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00079-X)
- Lasanta, T., Vicente Serrano, S.M. & Cuadrat, J.M., 2005. Spatial-temporal variability of the plant landscape in the Mediterranean highlands due to the abandonment of traditional land uses: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25: 47-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2004.11.001>
- Lopez, R. & Justribo, C., 2010. The hydrological significance of mountains: a regional case study, the Ebro River basin, Northeast Iberian Peninsula. *Hydrological Sciences Journal*, 55(2): 223-233. <http://dx.doi.org/10.1080/02626660903546126>
- López-Moreno, J.I., 2005. Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2): 253-260. [http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0253:RVOSDI\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0253:RVOSDI]2.0.CO;2)
- López-Moreno, J.I., Beguería, S. & García-Ruiz, J.M., 2004. The management of a large Mediterranean reservoir: storage regimes of the Yesa reservoir, Upper Aragón River basin, Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 34(4): 508-515. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-003-0249-1>
- López-Moreno, J.I. & García-Ruiz, J.M., 2004. Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *International Journal of Hydrological Sciences*, 49(5): 787-802.
- López-Moreno, J.I., García-Ruiz, J.M. & Beniston, M., 2008a. Environmental Change and water management in the Pyrenees. Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, 66 (3-4): 300-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.004>
- López-Moreno, J.I., Goyette, S. & Beniston, M., 2008b. Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and expected changes over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology*, 28 (11): 1535-1550. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1645>
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., El Kenawy, A.M. & Angulo M., 2010. Trends in daily precipitation on the North-Eastern Iberian Peninsula, 1955-2006. *International Journal of Climatology*, 120: 248-257. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1945>
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J. & García-Ruiz, J.M., 2011a. Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Science*, 15: 311-322. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-311-2011>
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Morán-Tejeda, E., Lorenzo, J., Kenawy, A. & Beniston, M., 2011b. NAO effects on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationships and projections for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 77: 72-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.003>
- López-Moreno, J.I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S.M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M. & Tague, C., (en prensa). 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 Journal*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.031>
- Lorenzo-Lacruz J., Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I., González-Hidalgo, J.C., Morán-Tejeda, E. & Zabalza, J., 2012. Recent trends in Iberian river flows (1945-2005). *Journal of Hydrology*, 414-415: 463-475. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>
- 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*, 437: 347-350. <http://dx.doi.org/10.1038/nature04312>
- Moriassi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. & Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 885-900. doi: 10.13031/2013.23153
- Nadal-Romero, E., Lasanta, T., González-Hidalgo, J.C., de Luis, M. & García-Ruiz, J.M., 2012. The effect of intense rainstorm events on the suspended sediment response under various land uses: The Aisa Valley Experimental Station. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38 (1): 27-47.
- Nakicenovic, N., Grübler, A. & McDonalds, A., 1998. *Global Energy Perspectives*. Cambridge University Press, 299 pp., Cambridge.
- Nogués-Bravo, D., Lasanta, T., López-Moreno, J.I. & Araujo, M.B., 2008. Climate warming in Mediterranean mountains during the XXIst century. *Ambio*, 37 (4): 280-285. [http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0253:RVOSDI\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0253:RVOSDI]2.0.CO;2)
- Nohara, D., Kitoh, A., Hosaka, M. & Oki T, 2006. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 1076-1089. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM531.1>
- O'Flanagan, P., Lasanta, T. & Errea-Abad, M.P., 2011. Restoration of sheep transhumance in the Ebro Valley, Aragon, Spain. *Geographical Review*, 101 (4): 556-575. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1931-0846.2011.00117.x>
- Parajuli, P.B., 2010. Assessing sensitivity of hydrologic responses to climate change from forested watershed in Mississippi. *Hydrological Processes*, 24 (26): 3785-3797. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7793>
- Quiñonero-Rubio, J.M., Boix-Fayos, C. & de Vente, J., 2013. Desarrollo y aplicación de un índice multifactorial de conectividad de sedimentos a escala de Cuenca. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 39 (2): 203-223.
- Stanhill, G., 1970. Some results of helicopter measurements of the albedo of different land surfaces. *Solar Energy*, 13: 59-66. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(70\)90007-1](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(70)90007-1)
- Tague, C. & Band, L., 2004. RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System: An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water and nutrient cycling. *Earth Interactions*, 8: 1-42. DOI: 10.1007/s10584-006-9201-8.
- Tong, S.T.Y., Sun, Y., Ranatunga, T., He, J. & Yang, Y.J., 2012. Predicting plausible impacts of sets of climate and land use

- change scenarios on water resources. *Applied Geography*, 32: 477-489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.014>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., García-Vera, M.A. & Stepanek, P.A., 2010. Complete daily precipitation database for North-East Spain: reconstruction, quality control and homogeneity. *International Journal of Climatology*, 30 (8): 1146-1163. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1850>
- 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(7), W07447. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Warburton, M.L., Schulze, R.E. & Jewitt, G.P.W., 2012. Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology*, 414-415: 118-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.028>
- Weatherhead, E.K. & Howden, N.J.K., 2009. The relationship between land use and surface water resources in the UK. *Land Use Policy*, 265: 243-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.007>
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. & Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90: 169-185. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)