

INTERACCIONES MONTAÑA–LLANURA FRENTE AL CAMBIO GLOBAL: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN LA GESTIÓN DEL TERRITORIO Y DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN RIEGOS DEL ALTO ARAGÓN

Highland–lowland interactions in a context of global change: challenges and opportunities in land and water resources management in new irrigated lands

Santiago Beguería¹, David Haro-Monteagudo², Leticia Palazón¹, José M. García-Ruiz^{3*}

¹Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC), Campus de Aula Dei, 50.080-Zaragoza, España.

²Northern Rivers Institute, Department of Geography and Environment, School of Geosciences, University of Aberdeen, Aberdeen AB9 2UF, UK.

³Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Campus de Aula Dei, 50.080-Zaragoza, España.

Código ORCID y e.mail de los autores

Santiago Beguería: <https://orcid.org/0000-0002-3974-2947>. E-mail: santiago.begueria@csic.es.

David Haro-Monteagudo: <https://orcid.org/0000-0002-7885-8248>. E-mail: david.haromonteagudo@abdn.ac.uk.

Leticia Palazón: <https://orcid.org/0000-0002-5773-1723>. E-mail: lpalazon@eead.csic.es.

José M. García-Ruiz: <https://orcid.org/0000-0002-8535-817X>. E-mail: humberto@ipe.csic.es.

*Autor corresponsal

Recibido: 23-06-2022. **Aceptado:** 03-08-2022 **Publicación on-line:** 07-11-2022

Citación/Cómo citar este artículo: Beguería, S., Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., García-Ruiz, J.M. (2022). Interacciones montaña-llanura frente al cambio global: desafíos y oportunidades en la gestión del territorio y de los recursos hídricos en Riegos del Alto Aragón. *Pirineos*, 177, e072. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2022.177005>

RESUMEN: La transformación del secano en regadío en el sector central de la Depresión del Ebro ha representado un cambio espectacular en las condiciones de cultivo de un territorio de características semiáridas y precipitaciones muy irregulares. Sin embargo, los nuevos regadíos se enfrentaron desde un principio a graves problemas estructurales debido al peculiar diseño del sistema de regadío, las limitaciones de sus objetivos, la lentitud con que se fueron construyendo las infraestructuras necesarias (embalses, canales y acequias secundarias) y el acondicionamiento de los campos de cultivo. Este trabajo se centra en el estudio de las limitaciones a que se enfrentan los regadíos de Riegos del Alto Aragón (R.A.A.) debido a la tendencia que muestran los recursos hídricos y su distribución estacional como consecuencia de la evolución de temperaturas y precipitaciones, la expansión de la superficie forestal y de matorrales en áreas de montaña

y el progresivo aterramiento a que se enfrentan los embalses. Para ello se ha revisado la información disponible sobre el Cambio Global en el Pirineo y se han aplicado diversos modelos climáticos e hidrológicos. La necesaria modernización ha mejorado los sistemas de riego, ha incrementado la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, y ha permitido la introducción de nuevos cultivos mucho más productivos y rentables. Paradójicamente, la modernización también ha conllevado un aumento del consumo de agua y ha obligado a incrementar las reservas internas del sistema mediante la construcción de pequeños embalses y balsas. Esta mayor demanda de agua coincide con una progresiva reducción en la disponibilidad de recursos hídricos, debida no solo al incremento de la temperatura media sino también a los cambios en la dinámica de la acumulación y fusión de nieve en alta montaña y a la expansión de bosques y matorrales en antiguos campos de cultivo abandonados en los valles pirenaicos, lo que reduce la capacidad de generación de escorrentía y los caudales fluviales. Se prevé que estas tendencias se acentúen en el medio y largo plazo como consecuencia del cambio climático. Además, el progresivo aterramiento de los embalses reduce año tras año la capacidad de almacenamiento de agua. Estos procesos, que ponen de manifiesto la importancia de las interacciones entre las áreas de montaña y las regiones de piedemonte, obligarán a medio plazo a reorganizar la gestión de los recursos y de los procedimientos de regadío, así como la progresiva incorporación de cultivos de mayor valor añadido que compensen el incremento de los costes de producción ligados a una mayor dependencia de los regadíos respecto de la energía.

PALABRAS CLAVE: Nuevos regadíos, modernización de riego, Cambio Global, recursos hídricos, nieve, embalses, Monegros, Riegos del Alto Aragón.

ABSTRACT: The transformation of rainfed agriculture lands into irrigated lands in the central sector of the Ebro Depression has represented a spectacular change in the cultivation conditions of a semi-arid territory affected by scarce and irregular precipitation. However, the new irrigation systems faced serious structural problems from the beginning due to the peculiar design of the irrigation system, the limitations of its objectives, the slow pace with which the infrastructures were built (reservoirs, canals and secondary ditches) and the conditioning of cultivated fields. This work focuses on the study of the limitations faced by *Riegos del Alto Aragón* due to the trend shown by water resources and their seasonal distribution as a result of the evolution of temperature and precipitation, the expansion of woody vegetation in mountain areas and the progressive silting up of the reservoirs. For this, the information available on Global Change in the Pyrenees has been reviewed and climatic and hydrological models have been applied. The necessary modernization has improved the irrigation systems and water use efficiency, and has allowed the expansion of much more productive and profitable crops. Paradoxically, modernization has also increased the water demand, and has made necessary to increase the system's internal reserves through the construction of small reservoirs and ponds. This greater water demand coincides with a decreasing trend in water resources availability, due not only to the increase in average temperature, but also to changes in snowpack accumulation and melting dynamics in the Pyrenean headwaters and to forest expansion in old abandoned fields in the Pyrenean valleys, which reduces runoff generation and streamflow. It is foreseeable that most of these processes will continue or even accentuate in the medium- to long-term due to climate change. In addition, the progressive silting up of the reservoirs reduces the water storage capacity year after year. These processes, which highlight the interactions between mountain areas and the lowlands, will force in the medium term to reorganize the management of resources and irrigation procedures, as well as the progressive incorporation of crops with increasing added value that offset the rise in production costs linked to a stronger dependence of irrigation with respect to energy.

KEY WORDS: New irrigated land, irrigation modernization, Global Change, water resources, snow, reservoirs, Monegros, Riegos del Alto Aragón.

1. Introducción

El desarrollo de nuevos regadíos en España durante el siglo XX representó un notable cambio de estrategia en la gestión del territorio y de los recursos hídricos. Con anterioridad, los llamados regadíos tradicionales tuvieron una gran importancia al contribuir a la subsistencia de la población en las áreas rurales y al aportar rentas mediante la comercialización de productos hortofrutícolas en los

centros urbanos próximos. Esos regadíos se limitaban esencialmente a las terrazas fluviales más bajas, donde la derivación de las aguas mediante acequias era más sencilla (Higueras, 1969; Lasanta, 2009). Ocupaban espacios generalmente reducidos (las clásicas huertas), organizadas en pequeñas parcelas que con frecuencia estaban cerradas, con suelos profundos y alta concentración de materia orgánica, dando lugar a un sistema muy productivo que se explotaba de manera intensiva, es decir, con

el aporte de mucha energía humana y animal por unidad de superficie. Estos regadíos tradicionales remontan su origen a época romana o incluso anterior (López-Gómez, 1974; Butzer *et al.*, 1989; Box Amorós, 1992; de Bernardo Stempel, 2007; Laliena, 2008) y fueron mejorados y ampliados durante la dominación musulmana, cuando se introdujeron nuevas técnicas de extracción y distribución del agua (Manzano Moreno, 1986; Box Amorós, 1992). Es el caso de los regadíos en los cursos bajos de los ríos Turia y Segura, con un aprovechamiento intensivo de los recursos hídricos desde al menos la Baja Edad Media. Este aprovechamiento conllevó el desarrollo de complejas normativas e instituciones para la gobernanza del agua (por ejemplo, el Tribunal de las Aguas de Valencia: López Gómez, 1974; Butzer *et al.*, 1989).

El progresivo incremento de la población desde la Baja Edad Media obligó a planear regadíos de mayor extensión, destacando en el valle del Ebro la construcción de la Acequia Imperial en el siglo XVI, aunque solo pudo ponerse parcialmente en funcionamiento debido a fenómenos de subsidencia de los yesos miocenos próximos al eje del Ebro (Fernández Marco, 1961). A finales del siglo XVIII se retomó la idea de crear una extensa área de regadío en la margen derecha del Ebro con la construcción del Canal Imperial de Aragón desde la ciudad navarra de Tudela hasta varias decenas de kilómetros aguas abajo de Zaragoza, ocupando terrazas medias y bajas del río Ebro (Fernández Marco, 1961). Este regadío, similar al creado a expensas del Canal de Castilla entre mediados del siglo XVIII y mediados del XIX (Sola Alonso, 2015), responde a las inquietudes de la Ilustración por crear infraestructuras que contribuyeran a mejorar las condiciones de la población. A diferencia de los regadíos más tradicionales, las parcelas regadas desde el Canal Imperial de Aragón eran de mayor tamaño y no estaban cerradas, además de ocupar suelos en general menos fértiles al estar más alejados de los cauces de los ríos. Inicialmente se destinaron sobre todo a la producción de cereales de invierno hasta que la construcción entre 1929 y 1945 del embalse del Ebro (541 hm³ de capacidad) en la cabecera de este río aseguró los aportes hídricos incluso durante veranos secos (Conde Oria, 2019). Este fue un hito importante, porque mostró que la construcción de grandes embalses podía transformar los cultivos y generar una producción destinada a agroindustrias de mayor envergadura, como fue el caso del cultivo de la remolacha y su vinculación con la industria azucarera (Frutos, 1976).

Sin embargo, desde la segunda mitad del siglo XIX la perspectiva fue diferente. En ese momento era evidente la decadencia general de España, la pobreza de la población rural y sus escasas posibilidades de promoción cultural y económica, problemas que se consideraban estructurales y sistémicos. En respuesta a esa situación, el Regeneracionismo liderado por una serie de intelectuales con una perspectiva más global e ideas radicales (entre otros, Joaquín Costa y Lucas Mallada) se plantea la transformación de grandes superficies de secano en regadío allí donde el déficit hídrico era más acusado (por escasez de precipitaciones y elevada evapotranspiración). De estas ideas sur-

gió la necesidad de una política hidráulica de mayor alcance (Gómez Mendoza, 1992), basada en la construcción de grandes embalses y canales y en la transformación a regadío de extensas superficies no necesariamente vinculadas a valles fluviales como en el regadío tradicional, sino a las extensas planicies situadas entre los ríos. Surgen así los llamados nuevos regadíos, cuyo ejemplo más acabado corresponde a los Riegos del Alto Aragón (en adelante, R.A.A.). La planificación de R.A.A., que se apoyó en la utilización de los recursos hídricos de dos de las cuencas tributarias más importantes de la margen izquierda del río Ebro (las de los ríos Gállego y Cinca), contempló no solo un elevado uso de los recursos de agua sino también la transformación de grandes superficies de secano, la alteración de la distribución de la propiedad de la tierra, al menos parcialmente, y la redistribución de la población, con la construcción de los llamados pueblos de colonización. Por lo tanto, se trataba de un cambio profundo que debería servir para aumentar la producción agrícola, elevar las rentas y la cultura de la población, además de incrementar la densidad demográfica y estabilizar los núcleos de población. A lo largo del siglo XX hubo otras regiones que siguieron hasta cierto punto el patrón de R.A.A., sobre todo en lo relacionado con la política hidráulica de construcción de grandes embalses y canales. Es el caso del Plan Jaén, el Plan Badajoz, Bardenas entre Navarra y Aragón, los regadíos en torno a Lérida, los de Castilla y León occidental y la expansión de los regadíos en el sureste de España vinculados al Trasvase Tajo-Segura. Es evidente que no todo ha salido bien y que los agricultores se enfrentan a un número creciente de problemas, muchos de ellos de difícil solución, especialmente en R.A.A., donde se ha dado una notable reorganización de la gestión de los recursos hídricos (Playán & Mateos, 2006; Playán *et al.*, 2007; Lecina *et al.*, 2010; Jlassi *et al.*, 2016), cambios en el tamaño de las explotaciones y, especialmente, una auténtica revolución en los cultivos, atendiendo a mercados muy dinámicos a los que los agricultores se han tenido que adaptar (Lasanta, 2009).

Los R.A.A. constituyen un caso muy peculiar. Su desarrollo se ha extendido a lo largo de más de un siglo hasta llegar a constituir la mayor superficie de regadío de la Unión Europea, y han estado sometidos a notables cambios en las últimas décadas (Jlassi *et al.*, 2016). Además, muestran una notabilísima dependencia de los recursos hídricos generados y almacenados en el Pirineo aragonés, donde algunos indicadores muestran una marcada tendencia decreciente en el volumen de tales recursos. Dado que la demanda de agua no ha parado de crecer, ligada tanto a la modernización del regadío como a la expansión superficial del área regada, que se ha prolongado hasta el inicio del siglo XXI, asistimos a un grave problema que amenaza al actual estatus de R.A.A. Estamos, pues, ante una marcada y compleja interacción entre una región montañosa y la llanura que se desarrolla a su pie, cuyo futuro dependerá en buena parte de la evolución que experimente el caudal de los ríos pirenaicos y también, como se mostrará a continuación, de la erosión del suelo en las áreas que drenan hacia los embalses. La obligación

de los gestores, tanto en la montaña como en las zonas de regadío, es pensar a muy largo plazo. En caso contrario, la palabra sostenibilidad, tan (mal) utilizada actualmente en diversos ámbitos, carecería de sentido.

Este trabajo tiene por objeto analizar la evolución experimentada por R.A.A. e identificar los grandes riesgos a que se enfrenta en el futuro, para lo que se proponen algunas soluciones económica y ambientalmente amigables para los agricultores y para la estabilidad del sistema, sin que ello comprometa el manejo del territorio en la montaña. Se trata, en última instancia, de profundizar en las interacciones entre las regiones de montaña, generadoras de recursos hídricos con tendencia decreciente, y las áreas de regadío en las llanuras, consumidoras de grandes volúmenes de agua con demanda creciente. Todo ello en un contexto de cambio global que ha evolucionado en paralelo a la modernización de los nuevos regadíos y a las continuas transformaciones de los mercados.

2. El área de estudio

El territorio de Riegos del Alto Aragón (entre 41°21' y 42°09' N y entre 0°18' y 0°43' W) se localiza en el centro de la Depresión del Ebro (nordeste de España), limitando al oeste con el río Gállego y al este con el río Cinca, dos de los principales afluentes del río Ebro por su margen izquierda (Figura 1). El límite septentrional es el Canal del Cinca, que procede de este río y fluye hasta encontrarse en el llamado Abrazo de Tardienta con el Canal de Monegros, procedente del río Gállego y que constituye el límite meridional. R.A.A. forma parte de la Comunidad de Aragón, principalmente en la provincia de Huesca, con una pequeña penetración en la provincia de Zaragoza en su extremo sudoriental. Casi todo R.A.A. entra dentro de la comarca Los Monegros, si bien en su extremo nordeste engloba a parte del Somontano de Barbastro. En total, la zona regada se extiende por unas 126.000 ha, si bien den-

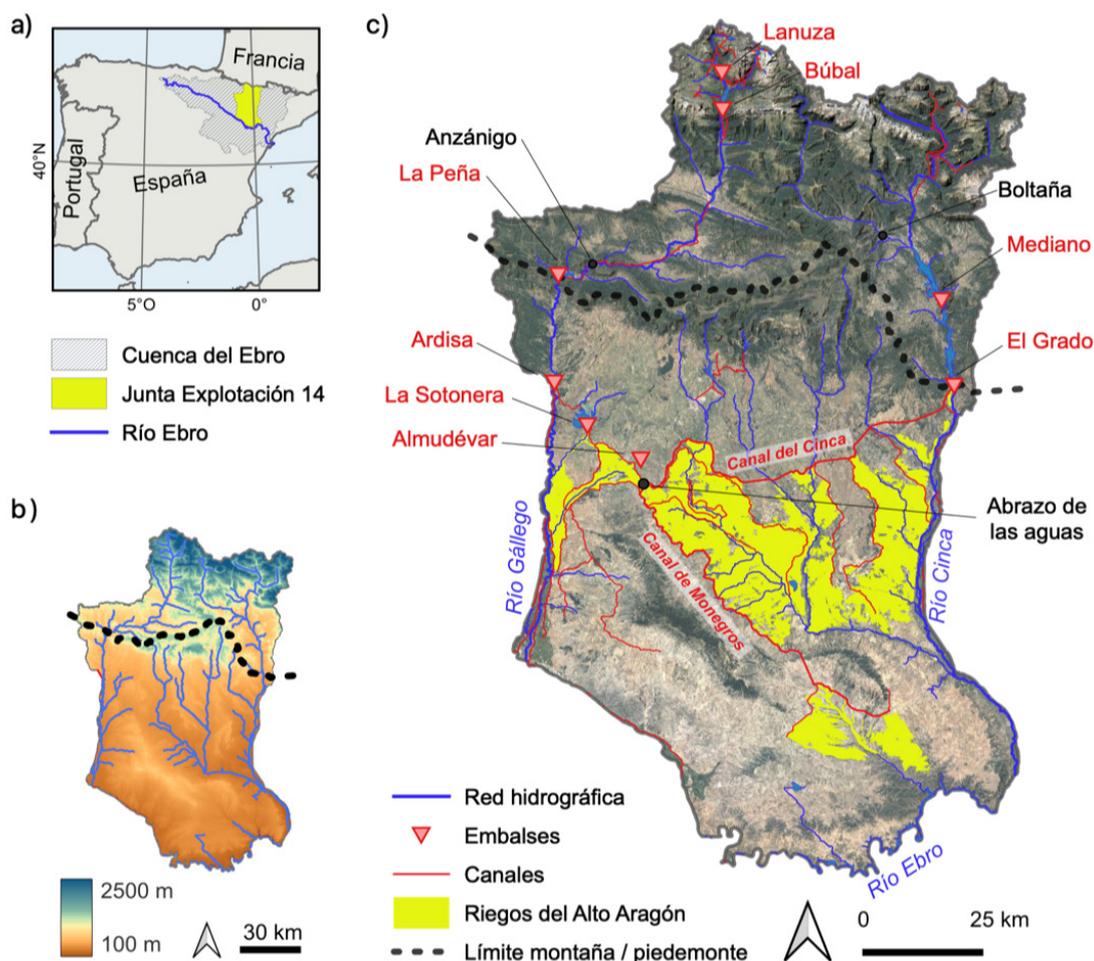


Figura 1. Área de estudio: a) localización de la Cuenca del Ebro y la Junta de Explotación 14 dentro de la Península Ibérica; b) relieve de la Junta de Explotación 14; c) localización del área de Riegos del Alto Aragón, elementos principales del sistema de gestión de los recursos hídricos, y otros topónimos importantes mencionados en el texto. Fuente de la imagen: Google.

Figure 1. Study area: a) location of the Ebro basin within the Iberian Peninsula; b) relief of the 'Junta de Explotación 14' area; c) location of 'Riegos del Alto Aragón' irrigated perimeter; the main structures (canals and reservoirs) of the water resources management system, and other toponyms cited in the text. Image source: Google.

tro del perímetro regado aparecen muchos sectores donde no ha sido posible implantar el regadío, fundamentalmente por problemas topográficos o geomorfológicos (glacis y terrazas demasiado elevados sobre canales y acequias, y terrenos erosionados). Desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos, R.A.A. se enmarca dentro de la Junta de Explotación 14 de la Confederación Hidrográfica del Ebro. La demanda para agua de riego de R.A.A. es la más importante por volumen de la Junta de Explotación, aunque existen también otras demandas de agua para regadío de menor volumen, concesiones para producción hidroeléctrica, y demandas para abastecimiento e industria.

La Depresión del Ebro es una de las grandes unidades estructurales del norte de la Península Ibérica, entre los Pirineos, el Sistema Ibérico y la Cordillera Costero-Catalana. Desde el Oligoceno se fue rellenando con sedimentos de origen continental dispuestos de forma aureolada desde los bordes hacia el centro, pasando desde conglomerados masivos (por ej., Mallos de Agüero y de Riglos, relieves de Montserrat, entre muchos otros) en el límite con las cordilleras circundantes hasta arcillas, yesos y sales en el centro, pasando por areniscas y areniscas alternando con arcillas en zonas intermedias. En el área de estudio el predominio corresponde a areniscas y arcillas, con algunas margas en la transición hacia el centro de la Depresión. La evolución del relieve se expresa en plataformas estructurales formadas por una superficie plana rodeada por escarpes abruptos, cerros testigo y glacis escalonados que pueden llegar a enlazar con terrazas fluviales. Muchos de los escarpes aparecen intensamente erosionados, a veces con tendencia al desarrollo de una densa red de cárcavas que conectan con rellenos holocenos a veces afectados por procesos de *piping* (formación de colapsos por hundimiento de conductos subsuperficiales). Estos procesos erosivos pueden aparecer también en campos de regadío, a condición de que se trate de suelos salinos o con elevado contenido en sodio, dificultando las labores agrícolas (García-Ruiz *et al.*, 1997; García-Ruiz, 2011). Peña-Monné *et al.* (2017) demostraron la rápida y compleja evolución del relieve en el centro de la Depresión del Ebro, debido a la interacción entre fluctuaciones climáticas y actividades humanas. La presencia de algunos relieves muy originales, típicos de ambientes áridos y semiáridos, ofrece potenciales oportunidades para un desarrollo turístico (Zglobicki *et al.*, 2019), aún no explotado.

El clima en el área de R.A.A. es de tipo mediterráneo de verano cálido en las zonas más altas, cambiando a netamente semiárido en una gran parte del territorio, según la clasificación de Köppen-Geiger (Beguería *et al.*, 2022a). La característica climática más notable es la escasez de precipitaciones y las elevadas temperaturas estivales, lo que hace que la evapotranspiración potencial anual esté próxima a 900 mm anuales (Ibarra & De la Riva, 2006) y explica la pobreza productiva de los cultivos de secano. Las precipitaciones superan por poco los 400 mm anuales en el norte del área de estudio (Almudévar, 442 mm) y están más cerca de los 300 mm en el resto del territorio (Pallaruelo de Monegros, 348 mm), concentradas sobre

todo en primavera y secundariamente en otoño. No obstante, la variabilidad interanual es muy elevada, con años excepcionales en que pueden superarse los 800 mm (por ejemplo, el año 1969 en Almudévar), frente a muchos otros años en que la lluvia anual no alcanza los 300 mm. La temperatura media anual está en torno a 14°C, con el mes más cálido (julio) registrando valores medios próximos a 26°C, mientras diciembre y enero presentan valores medios entre 3 y 5°C. En pleno verano las temperaturas máximas diarias superan los 32-35°C y las mínimas no suelen bajar de 22°C. Las heladas invernales son relativamente frecuentes, aunque no demasiado intensas, en general entre 0 y -5°C, favorecidas por inversiones térmicas regionales, más frecuentes en el sur de R.A.A. que en el norte (lo que explica la mayor presencia de cultivos de floración temprana como el almendro en este último sector). El número medio de días de niebla al año está en torno a 20, mientras que el viento del noroeste, persistente a lo largo de casi todo el año, contribuye aún más a la desecación ambiental, con velocidades que frecuentemente superan los 70 km h⁻¹. Estos datos redundan en el gran problema que ha afectado tradicionalmente a la comarca de Monegros desde un punto de vista agronómico: el profundo déficit hídrico climático, especialmente entre los meses de junio a octubre (García Ruiz *et al.*, 2003; Jlassi *et al.*, 2016).

Bajo estas condiciones climáticas los suelos no cultivados muestran una notable pobreza en materia orgánica y una permeabilidad relativamente baja, al estar afectados por el encostramiento producido por el impacto de las gotas de lluvia y el correspondiente *splash* (Ibarra-Benlloch & Pinilla-Navarro, 1999; Lasanta *et al.*, 2000). Son suelos con un pH básico y frecuentemente con elevada salinidad (Navas & Machín, 1997), reflejando elevadas pérdidas históricas de suelo que hacen aflorar el sustrato rocoso en superficie. Predominan los cambisoles calcáricos (especialmente en glacis y terrazas), calcisoles, fluvisoles y gipsisoles. Tras siglos de aprovechamiento agropecuario y forestal la cubierta vegetal en los lugares no cultivados muestra claros signos de deterioro. Pueyo (2013) pone de relieve que muchas de las plantas están bien adaptadas a las extremas condiciones locales: elevada insolación, escasas precipitaciones, fuertes vientos, suelos degradados y una larga historia de actividades humanas. En los lugares no cultivados escasean las formaciones forestales, compuestas sobre todo por sabina albar (*Juniperus thurifera*), pino carrasco (*Pinus halepensis*) y encina (*Quercus ilex rotundifolia*), dando lugar a bosques abiertos. En los lugares más degradados, los matorrales abiertos dominan el paisaje, formando mosaicos variados entre espacios erosionados, donde predominan enebros (*Juniperus oxycedrus*), lentiscos (*Pistacia lentiscus*), artemisia (*Artemisia herba-alba*), albardín (*Lygeum spartum*), escambrones (*Rhamnus lycioides*) y romero (*Salvia rosmarinus*), este último a veces formando paisajes casi monoespecíficos, como en Castejón de Monegros (Braun-Blanquet & Bolós, 1987; Montserrat, 1988; Pedrocchi, 1998). No obstan-

te, algunos barrancos guardan restos de una vegetación pasada más exuberante, incluyendo madroño (*Arbutus unedo*), durillo (*Viburnum tinus*), guillomo (*Amelanchier ovalis*), acerollo (*Sorbus domestica*) y arce (*Acer monspesulanus*) (Andreu *et al.*, 1996). No obstante, varios estudios paleoambientales en sedimentos lacustres muestran la presencia de bosques densos hasta al menos la Edad del Bronce, cuando se inicia a partir de 3500 BP un intenso proceso de deforestación (Valero-Garcés *et al.*, 2000; ver también Stevenson *et al.*, 1991; González-Sampériz, 2004).

Los aportes hídricos al sistema de R.A.A. proceden de los ríos Gállego y Cinca, cuyas cabeceras superan en algunos picos los 3000 m s.n.m., y los 2500 m en la mayor parte de sus divisorias principales. El clima en las áreas de cabecera es de tipo oceánico que transiciona a sub-polar en las zonas más elevadas (Beguiría *et al.*, 2022a). Las precipitaciones son abundantes, y el balance hídrico climático (precipitación menos evapotranspiración potencial) presenta un importante superávit que va desde 500 mm a más de 1000 mm. Buena parte de las precipitaciones son en forma sólida, formando un paquete de nieve que se acumula en las laderas durante la estación fría y funde principalmente entre los meses de marzo y mayo. El caudal medio de los ríos Gállego y Cinca es de $29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($930,5 \text{ hm}^3$ anuales) en el aforo de Santa Eulalia y de $50,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($1581,3 \text{ hm}^3$ anuales) al pie de la Presa de El Grado, respectivamente (García Ruiz *et al.*, 2001). Otros ríos menores circulan por el área de R.A.A. (ríos Flumen, Guatizalema, Alcanadre y Vero), aunque su influencia es mínima dado su escaso caudal y elevada irregularidad estacional e interanual, ligada a la variabilidad de las precipitaciones. No obstante, es interesante señalar que su caudal ha aumentado notablemente desde la existencia de R.A.A., especialmente durante la época de riegos, debido a que son receptores de los excedentes o efluentes de riego (García Ruiz *et al.*, 2001), con elevados contenidos en sal y otros elementos disueltos derivados del añadido de abono a los campos de cultivo (e.g. Faci *et al.*, 2000; Isidoro *et al.*, 2006).

3. Material y métodos

Este artículo combina una revisión de trabajos previos con nuevos datos procedentes de la aplicación de la modelización hidrológica bajo escenarios de cambio climático y de cambios en la gestión de los recursos hídricos (Haro-Monteagudo *et al.*, 2020, 2022). Se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Tool: Gassman *et al.*, 2007) para modelizar el ciclo hidrológico en las áreas de cabecera de los ríos Gállego (hasta la presa de Ardisa) y Cinca (hasta el Grado, cuando las aguas de ambos ríos son derivadas hacia los canales de Monegros y del Cinca; es decir, los puntos a partir de los cuales se deriva agua hacia los nuevos regadíos de R.A.A.). El modelo hidrológico se construyó utilizando datos de topografía (Shuttle Radar Topography Mission, $90 \times 90 \text{ m}$, Jarvis *et al.*, 2008), usos del suelo (EU CORINE Land Cover map, CLC2012 ver-

sion 20), propiedades de los suelos (Harmonized World Soil Database v 1.1, FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009). Se forzó con datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas diarias (SAFRAN-SPAIN, Quintana-Seguí *et al.*, 2017), y se realizó una calibración utilizando series de caudales naturalizados (Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE) para el periodo 1985-2000. Los resultados se validaron comparando las series de caudal predichas y observadas en el periodo 2000-2009 (para más detalles consultar Haro-Monteagudo *et al.*, 2020). Una vez validado, se utilizó un conjunto de proyecciones climáticas para el siglo XXI (AEMET, 2017) como forzamiento. Esto permitió crear un conjunto de proyecciones futuras de caudal de entrada a los embalses, bajo dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5, escenario intermedio con descenso de las emisiones a partir de 2040; y RCP 8.5, escenario extremo con incremento constante de las emisiones). En paralelo a la modelización hidrológica, se utilizó el caudal mensual y el almacenamiento actual en embalses para calibrar un modelo de gestión de los recursos hídricos del sistema (Aquatool; Andreu *et al.*, 1996). Este modelo simula la gestión de los embalses necesaria, de acuerdo con los recursos disponibles, para garantizar el suministro de todas las demandas existentes en el sistema. El dominio del modelo de gestión incluye la totalidad de la Junta de Explotación 14, ya que para una correcta simulación de las operaciones de desembalsado es necesario tener en cuenta todas las demandas existentes en el sistema, y no solo las de R.A.A. En las simulaciones de gestión se incorporó el nuevo embalse de Almuévar, cuya finalización está prevista para 2022. En combinación con los resultados anteriores de caudal de entrada a los embalses, se calculó la asignación de agua a las diferentes demandas del sistema en el futuro, para diferentes escenarios climáticos. Para no añadir complejidad a la simulación se consideró que las demandas actuales permanecían estacionarias en el futuro.

Respecto a la revisión de trabajos previos, se han tenido en cuenta sobre todo: (i) los estudios sobre evolución de caudales en relación con la expansión de la cubierta vegetal en la cabecera de las cuencas; (ii) la tendencia observada en la acumulación de nieve durante el invierno y comienzos de primavera, y su influencia sobre el régimen de los ríos Gállego y Cinca; (iii) la información disponible sobre el aterramiento de embalses y sus consecuencias sobre las reservas hídricas; (iv) el proceso de modernización de R.A.A. y sus consecuencias sobre la demanda de agua; (v) los problemas asociados a los cambios en los mercados; y (vi) la capacidad de adaptación de los agricultores a los problemas del sistema de R.A.A.

4. El Cambio Global y su influencia en R.A.A.

El Cambio Global suele definirse como el conjunto de cambios que afectan directa o indirectamente a las condiciones ambientales, incluyendo los cambios observados en temperaturas y precipitaciones, y sus consecuencias

sobre la dinámica de la nieve (acumulación y fusión) y los regímenes fluviales. El concepto de Cambio Global incluye también todas aquellas transformaciones en el territorio que tienen un impacto general sobre los suelos, la erosión, la cubierta vegetal o la disponibilidad de recursos hídricos. Son, en todo caso, cambios relevantes con notables efectos espaciales y temporales. Es decir, se propagan por extensas superficies del planeta y además son persistentes en el tiempo. En el caso de R.A.A., los procesos que se engloban bajo el concepto de Cambio Global coinciden en tener un impacto negativo sobre el recurso más importante del regadío, es decir, el caudal de los ríos y la capacidad de almacenamiento de agua.

4.1. La evolución de la temperatura y de las precipitaciones en las cabeceras pirenaicas

Desde mediados del siglo XIX se produce un cambio de ciclo en las condiciones climáticas a escala global, debido, en primer lugar, a la finalización de la Pequeña Edad del Hielo, un periodo más fresco que el actual (aproximadamente un grado centígrado menos de media, aunque con importantes fluctuaciones internas). Y, en segundo lugar, a la emisión de gases de efecto invernadero ligada a la industrialización, al incremento de la población, a la sobre-explotación de los suelos, a la expansión de la ganadería intensiva y al fenómeno de la globalización desde mediados del siglo XIX. La conjunción de ambos factores explica el consistente aumento de la temperatura y su intensificación desde mediados del siglo XX. En España, el

incremento de la temperatura anual ha sido de 1,2°C para las máximas y de 1,0°C para las mínimas, en el periodo 1916-2015 (González-Hidalgo *et al.*, 2020; Sandonis *et al.*, 2021). Este fenómeno tiene, como es lógico, representación en la cordillera pirenaica, donde desde 1960 se ha observado un incremento de la temperatura media anual de 0,25°C por década, con valores muy similares para las estaciones cálida y la fría (Figura 2) (García-Ruiz *et al.*, 2015), y de hasta 0,8°C por década en el periodo 1981-2010 (Beguería *et al.*, 2022a). Las proyecciones futuras, deducidas a partir de la aplicación de diferentes modelos climáticos, apuntan hacia un notable incremento de las temperaturas medias. López-Moreno *et al.* (2008a) estimaron este incremento entre 2,8 y 4°C para los escenarios B2 y A2, respectivamente, hacia finales del siglo XXI, mientras que el proyecto CLIMPY ofrece un rango entre 1,62 y 3,63°C, para los escenarios de emisiones RCP 4.5 y 8.5 (CLIMPY-OPCC, 2022). Naturalmente, esta tendencia tiene consecuencias directas sobre el estrés que deben soportar las plantas como consecuencia de un incremento de la evapotranspiración potencial. El proyecto PIRAGUA estimó este incremento en 120 (+12%) y 225 (+24%) mm hacia finales del siglo XXI con respecto al periodo de referencia (1981-2010) para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 como promedio para todo el Pirineo (PIRAGUA-OPCC, 2022). Y, por supuesto, afecta también a la evaporación directa de la humedad del suelo y la producida en los embalses que almacenan el agua para R.A.A.

La evolución reciente de las precipitaciones en los Pirineos no muestra una señal tan clara como la de las temperaturas. Analizando el periodo 1981-2010, se apre-

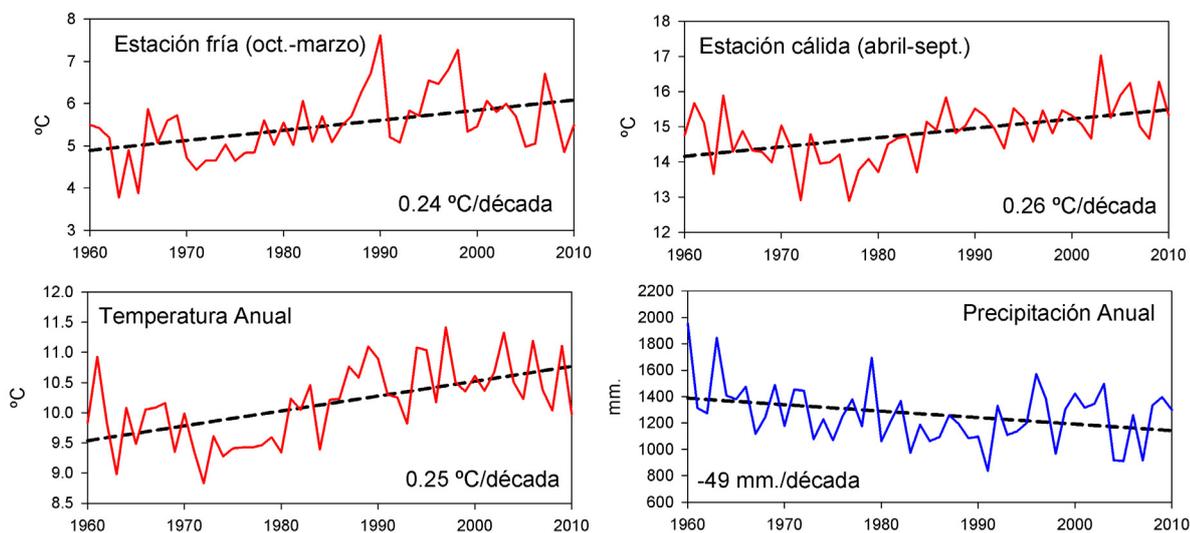


Figura 2. Evolución de la temperatura media anual en siete observatorios (Canfranc, Torla, Ansó, Aratorés, Castiello de Jaca, Biescas y Yéseiro), y de la precipitación media anual en nueve observatorios (Canfranc, Aratorés, El Pueyo de Jaca, Biescas, Boltaña, Parzán, Saravillo, Sesué y Eriste) del Pirineo aragonés. Tomada de García-Ruiz *et al.* (2015), elaborada por Sergio M. Vicente-Serrano.

Figure 2. Evolution of the average annual temperature at seven meteorologic observatories (Canfranc, Torla, Aratorés, Castiello de Jaca, Biescas and Yéseiro) and of the average annual precipitation in nine gaugeing stations (Canfranc, Aratorés, El Pueyo de Jaca, Biescas, Boltaña, Parzán, Saravillo, Sesué y Eriste) of the Aragón Pyrenees. Reproduced from García-Ruiz *et al.* (2015), generated by M. Sergio Vicente-Serrano.

cia un descenso de las precipitaciones de 14,5 mm por década a nivel de todo el macizo pirenaico, pero no alcanza la significación estadística (Beguiría *et al.*, 2022a). Las únicas tendencias significativas para este periodo se aprecian en el sector central del macizo y en la zona más occidental (río Bidasoa), con descensos de hasta 30 mm por década, aunque en otros sectores se observaron incrementos de precipitación en el mismo periodo. Tampoco se aprecia una tendencia estadísticamente significativa para el conjunto de los Pirineos y el periodo 1951-2010, según los datos del proyecto CLIMPY (CLIMPY-OPCC, 2022). Sin embargo, García-Ruiz *et al.* (2015) detectaron un descenso de la precipitación media anual estimado en 49 mm por década durante el periodo 1960-2010 (Figura 2). En la misma línea, López-Moreno *et al.* (2010) identificaron un marcado descenso de la precipitación durante el invierno y la primavera, afectando a la gestión de los embalses.

Las proyecciones futuras, sin embargo, apuntan en general hacia un descenso de las precipitaciones anuales en el Pirineo a lo largo del siglo XXI, particularmente entre los meses de mayo y octubre (Quintana-Seguí *et al.*, 2022). Además, García-Garizábal *et al.* (2014) han estimado en 2,5 mm por año el descenso de precipitación en el sector central de la Depresión del Ebro para el periodo 2011-2099. La explicación de estas tendencias negativas, tanto en el Pirineo como en la Depresión del Ebro, se asocia sobre todo al desplazamiento del cinturón de altas presiones subtropicales (anticiclón de las Azores) hacia latitudes más septentrionales (Fernández-García & Martín-Vide, 2004; Vicente-Serrano & López-Moreno, 2006; Vicente-Serrano *et al.*, 2007) y a la creciente influencia de la Oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation: NAO*) durante el invierno (Vicente Serrano & López-Moreno, 2008). El análisis de seis modelos GCM/RCM (*General Circulation Models/Regional Climate Models*) muestra una diversidad importante de resultados, mayor que en el caso de las temperaturas. Especialmente, los modelos coinciden en mostrar un notable gradiente espacial, con los mayores descensos de precipitación en la parte más occidental de la cordillera, y en su vertiente norte. En la parte más oriental (Pirineo catalán) la disminución de la precipitación se atenúa, e incluso se invierte la tendencia (hacia mayores precipitaciones) según algunos modelos, perdiéndose el acuerdo entre modelos en cuanto al signo de la tendencia. Para el conjunto de los Pirineos, y para el horizonte 2071-2100, las proyecciones arrojan descensos de entre 0 y 10% de la precipitación anual bajo un escenario RCP 4.5, y de hasta 15% para el RCP 8.5 (Quintana-Seguí *et al.*, 2022). Son valores similares a los indicados por López-Moreno *et al.* (2008a), con descensos entre 10,7 y 14,8%. Para un escenario A2 de emisiones, Vicente-Serrano *et al.* (2007) obtuvieron un descenso general de precipitaciones para el mismo periodo en torno a 157 mm anuales en la mayor parte del Pirineo Central, especialmente en primavera y verano, con un descenso en esta última estación de alrededor del 50% respecto al periodo de control (1961-1990).

Analizando las tendencias del clima en la zona de interés para R.A.A. entre 1970 y 2015, el aumento de la

temperatura es el cambio más evidente (Tabla 1). El registro instrumental de las temperaturas muestra incrementos similares en la cabecera y el valle de cerca de 0,6°C por década en el caso de las mínimas y 0,4°C en las máximas. Por meses, el incremento de las temperaturas se concentra en el periodo de marzo a junio en las máximas, y de marzo a noviembre en las mínimas. La precipitación, sin embargo, no muestra cambios significativos a nivel anual en ninguna de las dos regiones. Por meses, solo el mes de mayo muestra un descenso significativo de las precipitaciones en el área de cabecera, mientras que noviembre muestra un cambio positivo. En conjunto, pues, se puede decir que la precipitación no ha variado en las últimas décadas. No obstante, Vicente-Serrano (2013) ha detectado un incremento de la severidad de las sequías en el sector central de la Cuenca del Ebro, afectando directamente a la zona de R.A.A., debida no solo a la evolución de las precipitaciones sino también a la de las temperaturas, que conlleva un mayor estrés hídrico. La mayor intensidad de la sequía se detecta en la misma región incluso a nivel de la actividad vegetal, que se ha visto afectada negativamente (Vicente-Serrano *et al.*, 2012).

4.2. La evolución de la precipitación en forma de nieve y el cambio en los regímenes fluviales

La nieve tiene una función determinante en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos, y por ende del sistema de R.A.A. Debe tenerse en cuenta que el ciclo de acumulación y fusión de nieve se repite anualmente con una estacionalidad muy estable de un año a otro. Es decir, a partir de finales de noviembre la precipitación cae preferentemente en forma sólida en la media-alta montaña, manteniéndose el manto nival a lo largo de la estación fría por encima de 1600 m s.n.m., que es la altitud a la que se localiza, aproximadamente la isoterma de 0°C entre abril y mayo (Del Barrio *et al.*, 1990). Esa nieve está sujeta a breves eventos de fusión a medida que avanza la estación, hasta que la fusión va generalizándose a partir de mediados de abril. Habitualmente, la máxima fusión tenía lugar durante el mes de mayo, cuando coincide la escorrentía superficial producida por la fusión de nieve y la generada por las precipitaciones primaverales. Ese ha sido tradicionalmente el periodo de aguas altas en todos los ríos pirenaicos cuya cabecera se encuentre por encima del umbral altitudinal al que nos hemos referido. No obstante, hay una cierta variabilidad en el momento en que ocurre el periodo de aguas altas. Así, en los valles occidentales (Ansó, Hecho, Aragüés, Aísa, Aragón) el máximo se producía en mayo (de hecho, el periodo de aguas altas de primavera se denominaba tradicionalmente *mayencos*, precisamente por su persistente ocurrencia durante el mes de mayo), mientras que hacia el este el pico se desplazaba hasta junio, bien por una mayor altitud de las cabeceras, bien por una mayor continentalidad del clima. El ciclo anual de los regímenes fluviales se completaba con unos caudales bajos y constantes a lo largo del invierno, un estiaje moderado

Tabla 1. Tendencias en los promedios mensuales y anuales de precipitación (mm por década) y temperatura (°C por década) en la región de cabecera y de piedemonte del sistema E14 y en los aportes a los embalses (hm³ por década) en el periodo 1970-2015. Los valores resaltados en negritas indican significación estadística a un nivel $\alpha = 0.05$. (Fuente: Haro-Monteagudo *et al.*, 2020).

Table 1. Trends in the monthly and annual average values of precipitation (mm per decade) and temperature (°C per decade) in the highlands and lowlands of the E14 system and in the discharge contributions to the reservoirs (hm³ per decade) for the period 1970-2015. Figures in bold indicate statistical significance for a level $\alpha = 0.05$. (Source: Haro-Monteagudo *et al.*, 2020)

	Cabecera	Valle	Entrada embalses						
	Precip.	Temp. Max.	Temp. Min.	Precip.	Temp. Max.	Temp. Min.	Lanuza	La Peña	El Grado
Ene.	2.99	0.18	0.43	1.84	0.19	0.38	0	-0.59	-1.5
Feb.	-1.58	-0.01	0	-1.61	-0.14	0.04	-2.18	-5.66	-4.91
Mar.	9.14	0.64	0.65	6.22	0.46	0.48	0.8	-0.59	3.94
Abr.	5.85	0.77	0.91	5.23	0.7	0.88	1.14	6.01	10.5
May.	-9.61	0.86	0.78	-5.57	0.81	0.87	-4.07	1.71	-2.06
Jun.	-4.33	0.92	1.07	-2.36	0.99	1.04	-8.94	-4.1	-18.33
Jul.	6.02	0.21	0.43	2.72	0.25	0.53	-6.27	-0.24	-9.21
Ago.	0.51	0.17	0.43	0.81	0.26	0.67	-2.6	1.12	-3.27
Sep.	2.57	0.05	0.28	2.06	0.09	0.44	-1.87	-1.27	-2.49
Oct.	14.95	0.4	0.82	6.71	0.46	0.7	-0.43	-2.44	10.9
Nov.	16.95	0.02	0.85	5.19	0.12	0.73	1.19	-1.22	11.61
Dic.	-5.31	-0.09	0.17	-3.67	-0.08	0.11	0.67	-0.83	0.48
Anual	28.6	0.42	0.6	13.4	0.39	0.66	-25.23	-3.47	0

entre julio y septiembre (más acusado en los valles occidentales por el más rápido agotamiento de las reservas nivales), y un repunte de caudal en otoño ligado a la reactivación de las lluvias, a veces de carácter torrencial. Este ciclo era muy previsible y bastaba con estimar el volumen de nieve acumulada durante la estación fría (y su correspondiente equivalente hídrico: *Snow water equivalent, SWE*) para que se pudieran hacer cálculos aproximados del volumen de agua disponible durante el periodo de fusión y la que podría almacenarse en los embalses. De esta forma podrían establecerse pautas para la gestión de los recursos hídricos y su distribución en el área de R.A.A. Conviene señalar, no obstante, que la acumulación de nieve muestra una gran variabilidad interanual debido a su marcada sensibilidad respecto a las condiciones climáticas durante el invierno y la primavera (López-Moreno *et al.*, 2013).

Estudios en los afluentes de cabecera reflejan la importancia de los procesos de acumulación y fusión de nieve. Así, en la cuenca de Izas (alto valle del Gállego), durante el principal periodo de fusión (mayo y junio), la precipitación representa el 11% del total anual, mientras que el caudal asciende hasta el 48% del total anual en solo dos meses (Lana-Renault *et al.*, 2011). Por supuesto, conforme los ríos pirenaicos incorporan áreas altitudinalmente más bajas, la nieve pasa a tener una menor importancia, aunque tanto el río Gállego como el Cinca están muy influidos por la nieve a lo largo de todo su recorrido.

Sin embargo, la dinámica de la nieve ha experimentado importantes cambios en el Pirineo, de manera que también se observan cambios en los regímenes de los ríos pirenaicos. López-Moreno (2005) estudió la evolución del manto de nieve en el Pirineo Central. El principal resultado fue el descenso, estadísticamente significativo, del espesor de nieve durante la segunda mitad del siglo XX, más acusado a final de abril que a final de marzo (Figura 3), lo cual sugiere que se está adelantando el periodo de fusión nival. De hecho, los ríos occidentales del Pirineo aragonés muestran ya su máximo en abril, y no en mayo como sucedía habitualmente. En los ríos orientales del Pirineo aragonés la fusión tiende también a adelantarse un mes, presentándose a lo largo del mes de mayo en lugar de junio (López-Moreno & García-Ruiz, 2004). La Figura 4 muestra los regímenes fluviales de los ríos Aragón en Jaca, Gállego en Anzánigo y Ara en Boltaña en dos periodos diferentes: 1961-1990 y 1991-2020. En ella se refleja que el periodo entre 1991 y 2020 muestra: (i) una marcada tendencia al descenso del caudal medio en la mayor parte de los meses; (ii) el anticipo del periodo de aguas altas de primavera; y (iii) el más acusado estiaje entre julio y septiembre. Igualmente, Zabaleta *et al.* (2022) analizaron un conjunto de 42 estaciones de aforo a lo largo de toda la cordillera, encontrando un descenso generalizado de los caudales anuales en el periodo 1960-2019. Por meses, los descensos más acusados se produjeron en mayo y junio, los meses tradicionales del deshielo, mientras que abril y marzo

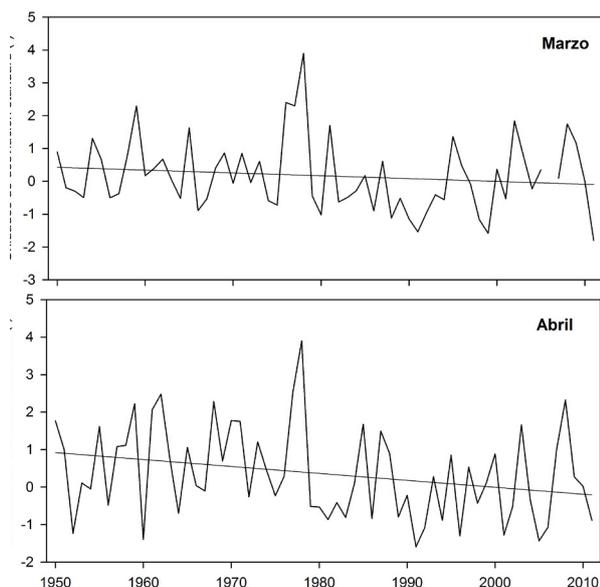


Figura 3. Tendencias en la acumulación de nieve en las cabeceras pirenaicas desde 1960 a finales de marzo y de abril. Tomada de García-Ruiz *et al.* (2015), elaborada por Juan I. López-Moreno.

Figure 3. Trends in snow accumulation in the headwaters of the Pyrenean river basins since 1960, at the end of March and April. Reproduced from García-Ruiz *et al.* (2015), generated by Juan I. López-Moreno.

mostraron un comportamiento mucho más moderado o incluso sin tendencia, compatible con un adelantamiento de la fusión nival. Esta evolución está relacionada sobre todo con el incremento de las temperaturas de invierno y primavera: los mismos factores que explican la marcada regresión, en área y volumen, de los glaciares pirenaicos (Chueca *et al.*, 2007; López-Moreno *et al.*, 2016, 2020; Vidaller *et al.*, 2020). A consecuencia del adelanto del periodo de caudales altos, los estiajes también se han acen tuado, haciéndose más prolongados e intensos.

De cara a la importancia hidrológica futura de la nieve en el Pirineo en un escenario de cambio climático, López-Moreno *et al.* (2013, 2015) mostraron que cada grado de incremento de la temperatura a lo largo del siglo XXI representará un descenso del 20% en la acumulación de nieve y una reducción de 20 a 30 días en la duración del manto nival. Esto tendrá una enorme trascendencia para el funcionamiento hidrológico de los ríos pirenaicos, la erosión y el transporte de sedimento, así como en las características de la cubierta vegetal dentro de unas pocas décadas si se cumplen las previsiones del IPCC. De hecho, la aplicación de modelos climáticos regionales a la cuenca experimental de Izas (en la cabecera de la cuenca del río Gállego) demostró la sensibilidad de la duración del manto de nieve y su espesor frente a los cambios de temperatura, precipitación y radiación solar (López-Moreno *et al.*, 2008b; Pons *et al.*, 2015). La mayor influencia se atribuye a los cambios en la temperatura, que es el

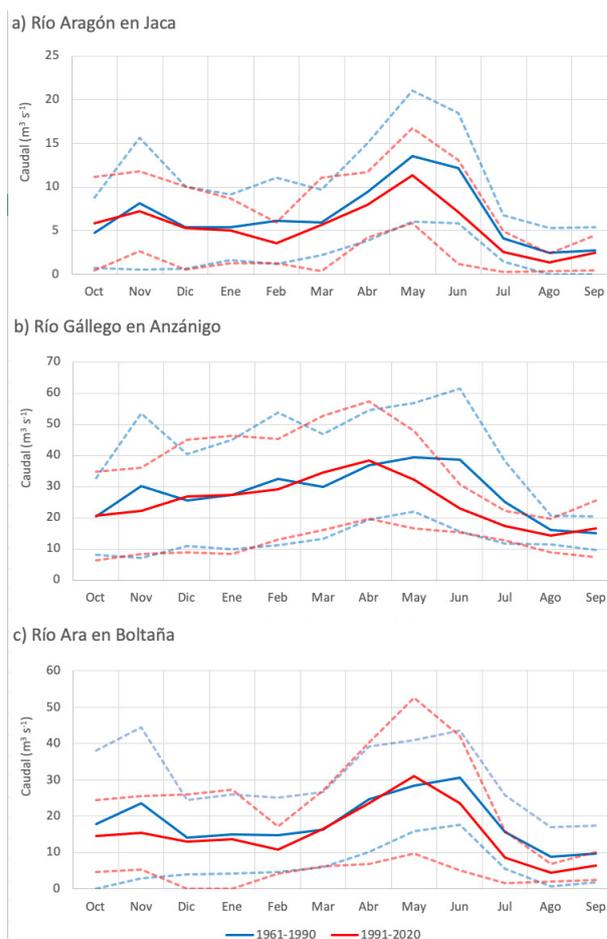


Figura 4. Regímenes mensuales de caudal en tres ríos del Pirineo Central durante los periodos 1961-1990 (líneas azules) y 1991-2020 (líneas rojas). Las líneas continuas indican el valor medio del periodo, mientras que las líneas de trazos indican los valores medios más y menos una desviación estándar.

Figure 4. Monthly streamflow regimes in three rivers of the Central Pyrenees during the periods 1961-1990 (blue lines) and 1991-2020 (red lines). The solid lines indicate the mean value of the studied period, while the dashed lines indicate the mean values plus and minus one standard deviation.

principal parámetro responsable de los cambios predichos para finales del siglo XXI en los futuros procesos nivales. Tras la aplicación de los nuevos modelos climáticos regionales, se comprobó que, en relación con la situación actual, se producirá un descenso del 50 al 60% en SWE y una reducción de la duración del manto nival en aproximadamente dos meses. Para la totalidad de los Pirineos, Quintana-Seguí *et al.* (2022) presentan proyecciones con notables descensos del paquete nival (SWE), que se traducen en una pérdida de fusión de nieve de entre el 25% y el 50% en los meses de abril a junio para el horizonte de final de siglo y los escenarios de emisiones RCP 4.5 y 8.5, respectivamente.

4.3. La expansión de la vegetación ligada al abandono de tierras de cultivo y al retroceso de la ganadería extensiva

Además de las características de precipitaciones y temperatura, así como su evolución futura, el otro factor que explica la evolución reciente de los caudales de los ríos pirenaicos es la cubierta vegetal. No debe olvidarse que esta última ejerce una enorme influencia en la interceptación de la lluvia, la capacidad de infiltración del agua en el suelo, y en el consumo de agua por las formaciones vegetales. Hoy se sabe que la interceptación del agua de lluvia por formaciones forestales puede representar entre el 12 y casi el 30% de la precipitación total (Llorens & Domingo, 2007). Diferentes estudios llevados a cabo en el Pirineo aragonés muestran que una cubierta forestal densa reduce notablemente el caudal. Así, el coeficiente de escorrentía en tres cuencas experimentales, una forestal, otra en una situación intermedia de colonización por parte de bosque y matorral tras siglos de cultivo, y una última con una parte afectada por cárcavas desnudas, se ha estimado en el 11%, 25% y 69% de la precipitación, respectivamente (Serrano-Muela *et al.*, 2008), siendo las condiciones climáticas muy similares en las tres cuencas. Por supuesto, la interceptación de la lluvia en los bosques pirenaicos varía notablemente de unas formaciones forestales a otras, estando en torno al 22% en bosques de *Pinus sylvestris*, alrededor del 23% en bosques de *Quercus faginea*, y entre el 17% en la estación fría y el 28% en la estación cálida bajo bosques de *Fagus sylvatica* (Serrano-Muela *et al.*, 2010). La respuesta de la cubierta forestal frente a las lluvias intensas registradas en el Pirineo aragonés también muestra grandes diferencias con la de otras formaciones más abiertas, a veces sin reaccionar apenas con ocasión de tormentas de verano o retrasando su respuesta y amortiguándola notablemente durante lluvias de larga duración y magnitud (Lana-Renault *et al.*, 2014; Serrano-Muela *et al.*, 2015).

Son bien conocidos los cambios que han afectado a la cubierta vegetal y los usos del suelo del Pirineo aragonés durante el último siglo. El máximo demográfico se registró en la segunda mitad del siglo XIX, coincidiendo con una crisis del sistema trashumante y de las actividades artesanales en la montaña, de ahí que se ampliase la superficie cultivada para ocupar todos los espacios disponibles por debajo de 1600 m s.n.m. y, especialmente, en exposiciones solanas. Se llegaron así a cultivar laderas muy pendientes, incluso con campos de agricultura nómada (*shifting agriculture*), que aumentaron la producción de escorrentía y, sobre todo, la erosión del suelo (Lasanta *et al.*, 2006). También los pastos subalpinos, base de la ganadería trashumante y trasterminante alcanzaron entonces su máxima extensión, creando un amplio territorio deforestado por encima de 1600 m s.n.m. (García-Ruiz *et al.*, 2020a). Desde la segunda mitad del siglo XIX los censos demográficos decrecieron de forma constante, acelerándose el proceso regresivo desde la década de 1950. El resultado final es que la superficie cultivada, que llegó a representar entre el 20 y el 40% de la superficie situada por debajo de 1600 m, se limita ahora al 3% del total, concentrada en terrazas fluviales de los fondos

de valle y conos de deyección parcial o totalmente estabilizados (Lasanta, 1988; 1989; Lasanta-Martínez *et al.*, 2005; García-Ruiz *et al.*, 2015).

Las consecuencias del abandono de tierras son bien conocidas: los antiguos campos de cultivo se han visto afectados por procesos de recolonización vegetal dominados inicialmente por la presencia de especies herbáceas, más tarde por un progresivo incremento de los matorrales y finalmente formaciones forestales en las condiciones topográficas y edáficas más favorables (Ruiz Flaño, 1993; Lasanta-Martínez *et al.*, 2005, 2017). A ello debe añadirse que el descenso de la presión ganadera y la sustitución parcial de rebaños de ganado ovino por el incremento del ganado vacuno han reducido el pastoreo en las laderas, impulsando también la expansión del bosque en el piso subalpino (García Ruiz *et al.*, 2015, 2020a).

Las consecuencias hidrológicas de la expansión de las formaciones forestales y de matorrales son también conocidas. Frente a la idea popular de que con más vegetación aumenta la precipitación y el caudal de los ríos, un paradigma dominante hasta finales del siglo XX (Andréassian, 2004), hoy se sabe que eso no es cierto, al menos en la zona templada donde la lluvia procede casi exclusivamente de la evaporación en océanos y mares y no de la humedad que pueda generarse debida a la evapotranspiración en las áreas continentales. Al contrario, numerosos estudios muestran un descenso de la escorrentía y de los caudales en ríos cuyas cabeceras se han visto afectadas por un proceso general de recolonización vegetal. Así, en el Pirineo aragonés, Beguería *et al.* (2003) llegaron a la conclusión de que, a partir de mediados de la década de 1960, los ríos llevan menos agua de la que cabría predecir en función de las precipitaciones y temperaturas anuales. A conclusiones similares han llegado Martínez-Fernández *et al.* (2012) al estudiar la evolución del caudal en 74 ríos seleccionados en España, y Morán-Tejeda *et al.* (2012) en ríos de la cabecera de la cuenca del Duero. De manera más general, García-Ruiz & Lana-Renault (2011) y García-Ruiz *et al.* (2011) confirmaron una tendencia regresiva en los recursos hídricos del Mediterráneo, ligada no solo a un descenso de la precipitación y un aumento de la duración de las sequías, sino sobre todo al abandono de tierras que ha conducido a un aumento general de las masas forestales. Un estudio reciente sobre la evolución de las sequías hidrológicas y climáticas en cuencas de cabecera de España (Peña-Angulo *et al.*, 2021) ha demostrado que la frecuencia, duración y severidad de las sequías hidrológicas son más marcadas que las tendencias de las sequías climáticas, lo que se debería al aumento de la cubierta vegetal. En el caso de los Pirineos, el descenso de los caudales desde mediados del siglo XX ha sido generalizado, y no puede explicarse solo por causas climáticas.

4.4. Los problemas de aterramiento en los embalses: el descenso en la capacidad de almacenamiento de agua

La progresiva e ineludible disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en los embalses debida

al aterramiento es un problema muy importante a la hora de valorar la evolución de los recursos hídricos y su disponibilidad en las áreas de regadío. Sin embargo, apenas se tiene en cuenta en los estudios a largo plazo. Es bien conocido que los embalses actúan como grandes trampas de sedimento, cuya capacidad de retención (ratio entre el sedimento que llega al embalse y el que sale) depende mucho del tamaño y forma del embalse (García Ruiz & López Bermúdez, 2009). En algunos grandes embalses la retención supera el 90% del sedimento, fundamentalmente en momentos de avenida. La sedimentación hace que cada año se reduzca la capacidad de embalsado. Por ejemplo, en la cuenca del Ebro, Batalla & Vericat (2011) han estimado que la actual carga sedimentaria del río Ebro en su desembocadura representa solo el 1% de la carga potencialmente transportada a comienzos del siglo XX, debido a la construcción de embalses en toda la cuenca (y también a la expansión de la cubierta vegetal en buena parte de la misma), lo que explica el actual déficit sedimentario en el delta del Ebro. El estudio de Batalla & Vericat (2011) confirma que el embalse de Mediano, uno de los embalses clave para el sistema de R.A.A., soporta una notable capacidad de retención de sedimento, con una tasa de sedimentación de $0,328 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$. Es interesante señalar que el embalse de Yesa (Figura 5) en la cuenca del río Aragón, que abastece a los regadíos de Bardenas, muestra valores similares de aterramiento (en torno a $0,39 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$), presentando una tendencia regresiva debido a la presencia de más bosques y matorrales en la cuenca (López Moreno *et al.*, 2003; Navas *et al.*, 2009). Estas cifras de aterramiento representan anualmente una pérdida anual de entre 0,07% y 0,08% respecto a la capacidad inicial. Son valores bajos pero importantes a largo plazo debido a que, de manera inevitable, conllevan una reducción de la capacidad anual de almacenamiento de agua cercana a 4 hm^3 por década en cada uno de los embalses señalados. En otros embalses pirenaicos el deterioro de la capacidad de embalsado ha sido muy notable. Tal es el caso del embalse de Barasona, en el río Ésera, donde Valero-Garcés *et al.* (1998) hallaron también elevadas tasas de sedimentación, aunque de nuevo con tendencia temporal decreciente. Así, este embalse había perdido en 1995 un tercio de su capacidad desde su construcción en 1932 (Valero-Garcés *et al.*, 1998), con una tasa de aterramiento de entre 2 y 18 cm por año según zonas (Navas *et al.*, 2009), aunque con tendencia decreciente (Bussi *et al.*, 2014). Por su parte, el embalse de Terradets, en el río Noguera de Pallaresa, ha perdido más de dos tercios de su capacidad desde que fue construido en 1931, pasando de tener una capacidad de 31 hm^3 a alrededor de 10 hm^3 sesenta años después (Van Beek *et al.*, 1991). Otros embalses de la cuenca del río Noguera Ribagorzana (embalses de Camarasa y Talarn) habían perdido en el año 2000 el 16 y el 19% de su capacidad, respectivamente (Casamor & Calafat, 2018). Para el conjunto de la cuenca del Ebro, el Libro Blanco del Agua estimó una pérdida total de 271 hm^3 (9% de la capacidad total de embalsado), lo que representa una media anual del 0,25% del volumen de embalsado inicial (Ministerio de Medio Ambiente,



Figura 5. Acumulación de sedimentos en el embalse de Yesa, en el río Aragón. Este fenómeno afecta con igual intensidad a los embalses que abastecen a Riegos del Alto Aragón, especialmente el de Mediano en el río Cinca.

Figure 5. Sediment accumulation in the Yesa reservoir, Aragón River. This phenomenon affects with equal intensity the reservoirs that supply water to Riegos del Alto Aragón, particularly the Mediano reservoir in the Cinca River.

2000). Dada la imposibilidad de eliminar los sedimentos depositados en los embalses, se recomienda reducir la conectividad entre las zonas productoras de sedimento y los cauces, especialmente en áreas de cárcavas localizadas en la proximidad de embalses, mediante pequeñas estructuras naturales que retienen el material erosionado en los cauces y favorecen su estabilización (Nadal-Romero & García-Ruiz, 2018).

4.5. La evolución de los recursos hídricos y su influencia en el régimen de los embalses

La mayor parte de los caudales aprovechados en el sistema de R.A.A. se genera en la cabecera, con muy poca contribución de las cuencas medias y bajas, tanto en el Prepireneo como en la Depresión del Ebro. Para el período de 1980 a 2006, la aportación anual promedio del río Gállego en el aforo de Anzánigo (aguas arriba del embalse de La Peña) fue de $907,6 \text{ hm}^3$, y la aportación anual promedio del río Cinca a los embalses de Mediano y El Grado fue de $1127,6 \text{ hm}^3$ (García-Ruiz *et al.*, 2001). La casi totalidad de las demandas del sistema de R.A.A. se satisfacen con recursos superficiales, no existiendo prácticamente aprovechamiento de aguas subterráneas (un 0,9% según datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro)

Los apartados anteriores indican una tendencia decreciente en la disponibilidad de recursos hídricos en el Pirineo aragonés, lo que obliga a hacer estimaciones más detalladas sobre el efecto del cambio climático o de la expansión de la cubierta vegetal en la cantidad de agua que circula en los ríos pirenaicos o sobre la gestión de los embalses. Sabemos que el régimen de los ríos pirenaicos

ha cambiado, con una reducción progresiva de la retención de nieve en las áreas de cabecera y un adelanto de aproximadamente un mes en la ocurrencia de las aguas altas primaverales debido precisamente a ese descenso en la acumulación nival, a la vez que los periodos de estiaje también se adelantan y acentúan al agotarse antes las reservas de nieve. Por otro lado, la interceptación de la lluvia y el mayor consumo de agua por parte de una cubierta vegetal cada vez más densa en antiguos campos de cultivos abandonados y en áreas de pastoreo ha provocado un descenso en la capacidad de generación de escorrentía de las cuencas pirenaicas. Así pues, en unas pocas décadas ha cambiado muy notablemente el escenario hidrológico, con descenso de caudales y alteraciones en el régimen de los ríos. Naturalmente, tales cambios afectan al ritmo de llenado de los embalses y, más a largo plazo, a la eficacia de su funcionamiento para abastecer a los regadíos del centro de la Depresión del Ebro.

Se ha estudiado el funcionamiento de varios embalses pirenaicos, el de Yesa, en el río Aragón, el de Mediano en el río Cinca y el de La Sotonera, alimentado mediante un canal de derivación desde el río Gállego. La Figura 6 muestra la evolución del volumen de agua almacenado en cada uno de los embalses, distinguiendo dos periodos, 1961-1990 y 1991-2020. Su funcionamiento puede considerarse típico de los embalses destinados preferentemente a regadío, con aumento constante del nivel de embalsado desde octubre hasta el mes de mayo en el caso de los embalses de Yesa y Mediano, y hasta el mes de junio en el embalse de La Sotonera. Desde entonces el nivel de embalsado desciende de forma rápida en verano para atender a la demanda de las áreas de regadío. Es en septiembre cuando se alcanza el nivel mínimo de agua embalsada (López Moreno *et al.*, 2000). Desde junio a septiembre las entradas al embalse son, pues, muy inferiores a las salidas. Quizás lo más interesante es que el régimen de llenado ha cambiado notablemente desde que los embalses iniciaron su funcionamiento. En el caso del embalse de Yesa el ritmo de llenado entre 1991 y 2020 se ha reducido, sobre todo por el descenso de la acumulación de nieve en la cabecera de la cuenca del río Aragón durante la primavera (López-Moreno *et al.*, 2004). Por otro lado, el máximo volumen de agua suele alcanzarse ahora en el mes de mayo, mientras que en el periodo 1961-1990 se conseguía en el mes de junio, y el descenso de volumen es mucho más intenso entre 1991 y 2020. En el caso del embalse de Mediano, el periodo 1991-2020 ha representado un notable adelanto en el ritmo de llenado y un rápido agotamiento de las reservas de agua entre julio y septiembre. Por último, el embalse de La Sotonera, que funciona de manera más regular debido a que su llenado tiene lugar mediante un canal desde el río Gállego, lo que se observa es un adelanto muy notable del periodo de llenado y un más rápido vaciado desde el mes de junio. Este embalse refleja que se está favoreciendo más el llenado durante el invierno debido muy probablemente a los problemas que plantea el descenso de los caudales de primavera en el río Gállego.

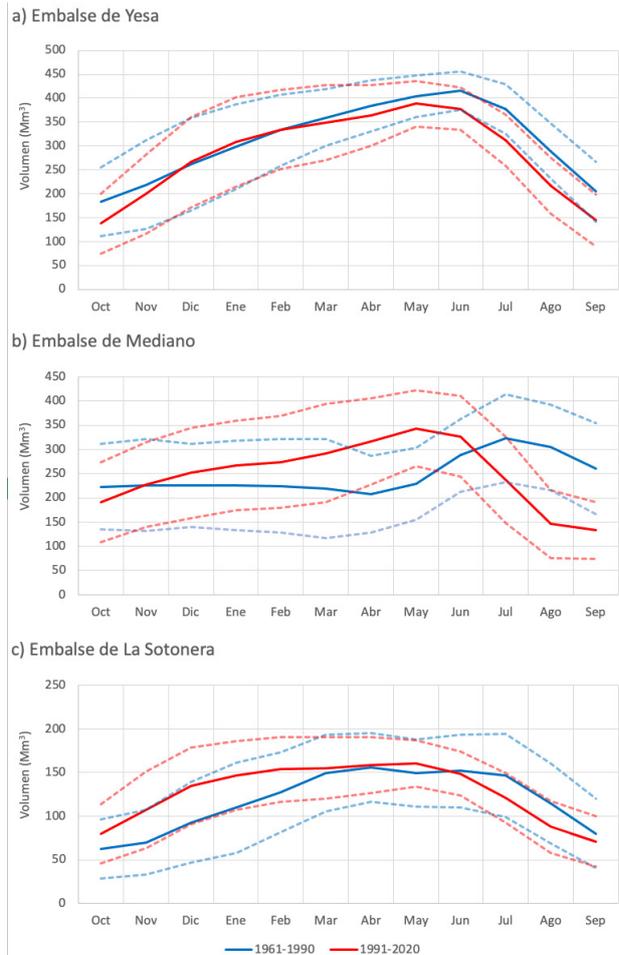


Figura 6. Regímenes de llenado de los embalses de Yesa, Mediano y La Sotonera durante los periodos 1961-1990 (líneas azules) y 1991-2020 (líneas rojas). Las líneas continuas indican el valor medio del periodo, mientras que las líneas de trazos indican los valores medios más y menos una desviación estándar. El volumen se expresa en millones de metros cúbicos.

Figure 6. Infilling regimes of the Yesa, Mediano and La Sotonera reservoirs during the periods 1961-1990 (blue lines) and 1991-2020 (red lines). The solid lines indicate the mean value of the studied period, while the dashed lines indicate the mean values plus and minus one standard deviation. The volume is expressed in millions of cubic metres.

Con respecto a los caudales de los ríos que abastecen al sistema de R.A.A., desde 1970 la aportación anual al embalse de Lanuza ha disminuido a un ritmo de más de 25 hm³ por década, sobre todo debido a los meses de verano (junio a septiembre). Por el contrario, las aportaciones del río Gállego en el aforo de Anzánigo, poco antes del embalse de La Peña, no han cambiado significativamente desde 1970. Por otro lado, aunque las aportaciones del río Cinca no han tenido cambios significativos a escala anual, el patrón mensual sí ha cambiado. Así, las entradas al embalse de El Grado se han reducido significativamente durante junio y julio, con mayores entradas durante los meses de otoño y primavera, aunque los cambios durante estos últimos periodos no fueron significativos (Tabla 1).

4.6. La evolución futura de los recursos hídricos

Las previsiones para el futuro indican de manera consistente que los recursos hídricos de los Pirineos van a seguir disminuyendo a lo largo del siglo XXI. Las proyecciones a partir de la combinación de modelos climáticos e hidrológicos indican, para el horizonte de finales de siglo, reducciones generalizadas de la aportación anual de los ríos pirenaicos de entre el 10% y más del 20%, con los descensos más importantes en la vertiente norte (Francia) y el sector occidental de la cordillera (Quintana-Seguí *et al.*, 2022). Estos valores se acentúan en los escenarios de emisiones menos optimistas. En el Pirineo Central, otros estudios han estimado las reducciones de aportación en cifras similares (del 10 al 20%) para 2041-2070, y próximas al 35% para finales del siglo XXI (Caballero *et al.*, 2007; Milano *et al.*, 2013; López-Moreno *et al.*, 2014).

Hay que tener en cuenta, no obstante, que las simulaciones futuras no han tenido en cuenta la posible evolución de los usos del suelo y la vegetación en la zona de cabecera, lo que podría acentuar aún más el descenso previsto de los caudales. Beguería *et al.* (2003) estimaron, mediante la aplicación de un modelo muy sencillo, una pérdida de recursos en torno al 30% debido exclusivamente a la expansión de la cubierta vegetal tras el abandono de tierras. Los autores reconocieron que se trata de una estimación algo tosca, pero indicativa de la tendencia, y en todo caso próxima a los datos aportados por otros autores en diversos lugares del mundo. La pérdida de caudal en los ríos pirenaicos en relación con el descenso de la cubierta vegetal está aún lejos de estabilizarse. Lo cierto es que las cabeceras de los ríos pirenaicos pueden aumentar la densidad de su cubierta vegetal en los próximos años, tanto en los campos abandonados en media montaña como en los pastos del piso subalpino, donde el descenso de la presión ganadera está provocando un rápido ascenso del frente pionero de colonización forestal (Figura 7). Al efecto del cambio climático deberá añadirse, pues, el del incremento de la vegetación, más difícil de cuantificar.

La utilización de un modelo de simulación hidrológica alimentado con diferentes proyecciones del clima futuro permite obtener simulaciones de los cambios esperables en los caudales en la cabecera del sistema de R.A.A. a lo largo del siglo XXI. A pesar de las diferencias entre las simulaciones forzadas por las seis proyecciones climáticas futuras, se aprecia un claro patrón general (Figura 8). Así, los caudales de entrada a los embalses muestran una tendencia general a aumentar durante el invierno (entre diciembre y febrero) y a disminuir el resto del año, con los descensos más acusados de mayo a septiembre, lo que representa una intensificación de los cambios que ya se han observado en las últimas décadas. Las diferencias se incrementan a lo largo del siglo XXI, existiendo pocas discrepancias entre los dos escenarios de emisiones. Considerando el escenario RCP4.5, los descensos de las aportaciones anuales varían entre el 5% y el 8% de media para el periodo 2011-2040 y el 10% y el 15% para el periodo 2071-2100, siempre en relación con el periodo de referencia 1981-2010. Estos valores se exageran hacia finales



Figura 7. Expansión del pinar de *Pinus sylvestris* y matorrales en las proximidades de la divisoria de Las Blancas, entre las cuencas de los ríos Aragón y Estarrún, como ejemplo de colonización de plantas leñosas a costa de los pastos subalpinos tras la reducción de los censos ganaderos y la crisis de los sistemas trashumantes y transterminantes.

Figure 7. Expansion of the Pinus sylvestris forest close to the Las Blancas divide, between the Aragón and Estarrún river basins, as an example of woody encroachment of the subalpine grasslands following the decline of the livestock censuses and the crisis of the transhumant and transterminant systems.

de siglo, y se acentúan en el escenario 8.5, donde llegan a alcanzar el 20% de media.

Como resultado de la menor aportación de caudal a los embalses que alimentan el sistema, la simulación de la gestión del sistema se encuentra con mayores dificultades para garantizar la satisfacción de las demandas de riego, suponiendo que éstas no varíen con respecto a la actualidad. Haro-Monteagudo *et al.* (2020) y Beguería *et al.* (2022b) han mostrado cómo los indicadores generales de sostenibilidad del sistema se degradan en el futuro, dando lugar a una mayor frecuencia de fallos (momentos en los que el suministro no satisface la demanda de riego), así como a una mayor frecuencia y magnitud de las restricciones al riego, de acuerdo con el actual plan de sequías. Los caudales ecológicos en los ríos Gállego y Cinca también se ven claramente perjudicados en los escenarios de cambio climático.

5. Las limitaciones de R.A.A. ligadas a su puesta en funcionamiento

Además de los problemas ambientales derivados de los cambios previstos en la montaña, los regantes de R.A.A. se enfrentan a problemas estructurales derivados de la forma en que se ha producido la transformación de secano a regadío. Es cierto que la creación de un área de regadío tan extensa como R.A.A. no es fácil de gestionar, pero en este caso la lentitud con que se han llevado a cabo las obras y las limitaciones edáficas en algunas partes de la zona transformada han contribuido a crear problemas muy difíciles de resolver en la actualidad.

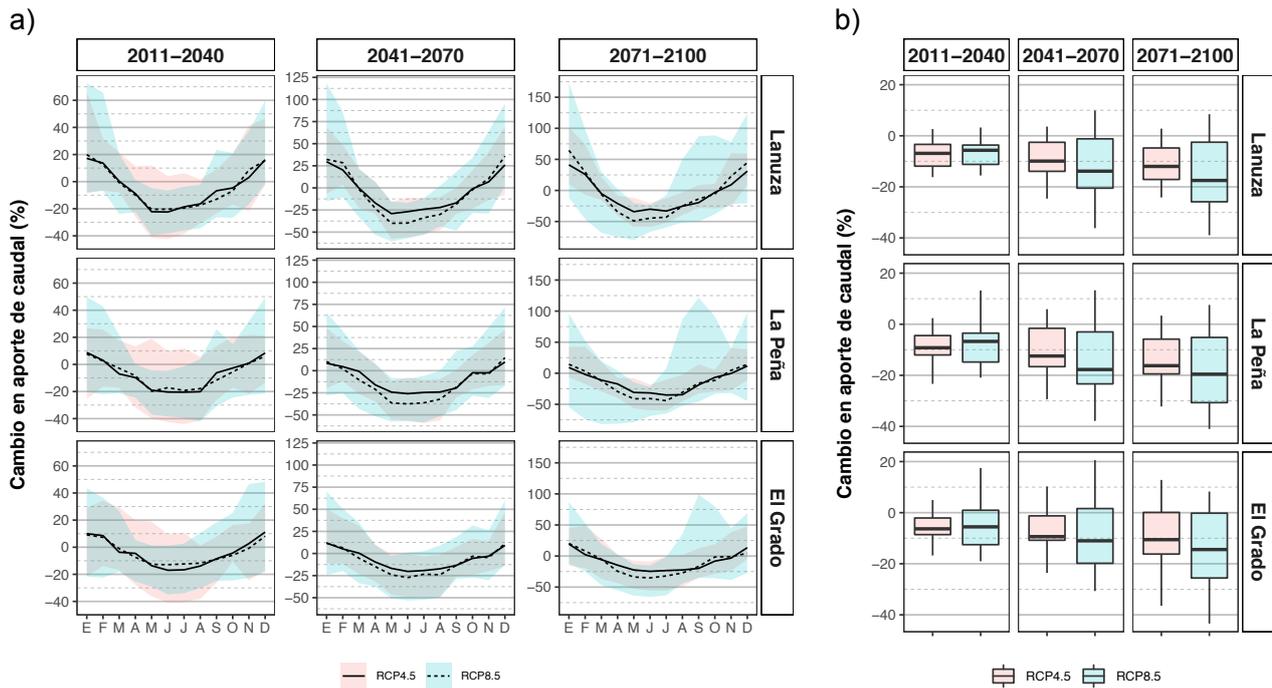


Figura 8. Cambio en los aportes mensuales (a) y anuales (b) a los embalses de Lanuza, La Peña y El Grado, expresado en porcentaje con respecto a la media del periodo 1981-2010, para los horizontes 2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100 y los escenarios de emisiones RCP 4.5 y 8.5. Las áreas de color en (a) indican la envolvente de los seis modelos climáticos evaluados, mientras que las líneas indican los valores medianos. Las cajas en (b) indican el rango de variación entre el 25% y el 75%, con la línea horizontal marcando el valor mediano (50%) y las líneas verticales marcando los valores extremos.

Figure 8. Changes in the monthly (a) and annual (b) contributions to the Lanuza, La Peña and El Grado reservoirs, expressed as a percentage with respect to the average of the 1981-2010 period, for the horizons 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100, under the RCP 4.5 and 8.5 emission scenarios. Coloured areas in (a) indicate the envelope of the six climate models evaluated, while the lines indicate the median values. Boxes in (b) indicate the range of variation between 25% and 75%, with the horizontal line marking the median value and the vertical lines showing the extreme values.

La idea de regar la región de Monegros se desarrolla lentamente en la segunda mitad del siglo XIX por los regeneracionistas que pretenden utilizar el agua como instrumento para crear riqueza (aumento de los rendimientos del cereal e incorporación de nuevos frutales y cultivos industriales como remolacha y algodón), fijar población, aumentar las infraestructuras e impulsar la educación, como estrategia global para la mejora de las condiciones de vida. El primer proyecto surge ya en 1855, con el Canal de la Princesa de Asturias, intento fallido por la falta de ambiciones en la dotación de agua y en la superficie que se hubiera visto afectada. En 1902 Joaquín Costa presentó el Plan Nacional de Aprovechamientos Hidráulicos, que impulsó primero el Canal de Aragón y Cataluña con agua derivada del río Ésera para regar 105.000 hectáreas en tierras limítrofes entre las provincias de Lérida y Huesca, y después el Plan de Riegos del Alto Aragón, con aguas de los ríos Gállego y Cinca (Bolea Foradada, 1986). Este último se elaboró en 1913 y fue aprobado en 1915, con el fin de regar 300.000 hectáreas, con un plazo de ejecución de 25 años, pero en la actualidad aún no puede darse por finalizado. Once años después de aprobado el proyecto

solo se había construido parte de la presa de Ardisa en el río Gállego, se habían iniciado las obras del embalse de la Sotonera, que se llena con aguas derivadas del Gállego desde el embalse de Ardisa, y solo se había llevado a cabo el primer tramo del Canal de Monegros (Germán Zubero, 2003). Algunas de las obras más importantes corresponden a la década de 1930, pero la unión de los canales del Cinca (88 km de longitud) y de Monegros (133 km), conocido como el Abrazo de Tardienta, no se produjo hasta 1982. El embalse de la Sotonera, en funcionamiento desde 1936, experimentó en 1969 una ampliación de su capacidad hasta alcanzar 189 hm³. El embalse de Mediano, en el río Cinca, fue aprobado en 1925, cuando aún no se había aprobado el proyecto del Canal del Cinca, y no se inauguró hasta 1971.

Todavía hubo muchos más cambios a lo largo del siglo XX: el embalse de Mediano aumentaría notablemente su capacidad al pasar de 102 a 436 hm³. Se construyó otro embalse en el Cinca, el embalse de El Grado, que entró en servicio en 1969, con una capacidad de 399 hm³, aunque solo una parte de este volumen (240 hm³) puede utilizarse en R.A.A. Por supuesto, se aumentó la capaci-

dad de los canales del Cinca y Monegros (90 y $72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente). Cambiaron también los objetivos del propio sistema de regadío. En 1913 se pensó sobre todo en incrementar la productividad de los cultivos de cereal, fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria de la nación y permanentemente amenazados por la escasez e irregularidad de las precipitaciones, mediante unos pocos riegos en invierno y primavera. Por eso, la dotación inicial de riego se cifraba en torno a 3000 m^3 de agua $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, pronto se vio que éste era un objetivo de muy corto alcance y que la dotación era muy insuficiente para cubrir las necesidades de otros cultivos de verano que con el tiempo serían imprescindibles para mejorar los ingresos de los agricultores. Se pasó así a una dotación media de $5000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 1980, y de $6900 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a lo largo del siglo XXI, gracias al redimensionamiento de embalses y canales y al abandono de algunas parcelas con suelos salinos o degradados por diversos procesos erosivos. Si en un principio se había previsto el riego de 300.000 ha , pronto se vio que sería imposible transformar más de 170.000 ha , debido a razones topográficas y de calidad de los suelos, a veces erosionados y, en ocasiones, con elevada salinidad. La superficie regada se sitúa actualmente en torno a 126.000 ha . Todavía a comienzos del siglo XXI seguía ampliándose el área regada en el extremo sudoriental de R.A.A. (municipios de Bujaraloz, Candanos, Valfarta y Peñalba). La Figura 1 muestra un esquema de la organización de R.A.A., que ha requerido la construcción de varios embalses, dos grandes canales y una compleja red de acequias, pequeñas centrales hidroeléctricas, miles de kilómetros de caminos rurales e incluso diez nuevos pueblos (los llamados pueblos de colonización), que atrajeron a nuevos pobladores venidos de diferentes regiones de España, sobre todo de Aragón (Bouzaida & Frutos, 2006).

6. Cambios en los sistemas de riego y de producción agropecuaria

Los cambios en los sistemas de regadío y en la producción agropecuaria han sido de gran envergadura. Desde que se iniciaron las primeras transformaciones de la agricultura de secano a regadío han transcurrido casi 90 años, tiempo suficiente para que la forma en que los agricultores y los responsables técnicos y políticos de R.A.A. perciben el uso del agua, la producción y la comercialización haya cambiado radicalmente. Desde los primeros agricultores de regadío, demasiado acostumbrados al secano y con pocos conocimientos acerca de la gestión del agua en los campos, hasta los actuales agricultores altamente tecnificados, con conocimientos sobre la variabilidad de los mercados y el aprovechamiento de determinadas oportunidades de comercialización, median muchas décadas y muchos cambios en las técnicas de riego y en los mercados. Los primeros agricultores de R.A.A., localizados en el sector más occidental de la región, recibían escasas dotaciones de agua y utilizaban el sistema de riego por inundación, que planteaba dos tipos

de problemas: (i) provocaba un notable despilfarro del agua de riego, y (ii) producía gran cantidad de flujos de retorno o excedentes de riego, generalmente cargados de nitratos y sales por lixiviación del suelo (Lasanta *et al.*, 2001; Causapé *et al.*, 2006, 2012; Isidoro *et al.*, 2006). Además, entre científicos y organizaciones ambientalistas subyacía la idea de que el gasto del agua y las inversiones realizadas en embalses y canales estaban sobredimensionados para el cultivo de cereales de invierno, incluso si la productividad había aumentado y se aseguraba una cosecha regular año tras año. Conforme los nuevos regadíos se fueron extendiendo hacia el este se consideró necesario introducir otros sistemas de riego más eficientes (aspersión y, en mucha menor medida, goteo), de manera que los últimos regadíos transformados, en el sector oriental y sudoriental de R.A.A., han estado dominados por estos nuevos sistemas. Paralelamente, desde la década de 1990 se trató de incorporar el riego por aspersión a las áreas anteriormente transformadas en regadío. Este proceso, que se conoce como “modernización del regadío”, se ha ido extendiendo de este a oeste, donde las primeras áreas regadas han sido menos propensas a los cambios (Frutos Mejías *et al.*, 2008; Jlassi *et al.*, 2016). En la actualidad, casi 100.000 ha se han modernizado o se encuentran en proceso de transformación, reflejando la necesidad de incorporar sistemas de riego más eficientes (Beguiría *et al.*, 2022b).

Así, pues, el llamado proceso de modernización se inicia con la introducción de sistemas de riego que permiten ajustar mucho mejor el consumo de agua. Paralelamente se procedió a concentrar los campos de cada propietario en muy pocas parcelas de gran dimensión para facilitar la mecanización y simplificar los turnos de riego. En ese proceso se eliminaron en muchos casos los saltos entre bancales, aumentando localmente la pendiente y favoreciendo la erosión del suelo. La sustitución del riego por inundación por el riego por aspersión tiene además otras ventajas, entre las que destacan la posibilidad de automatización del riego, una notable reducción de la exportación total de nitratos y sales (Cavero *et al.*, 2003; Causapé *et al.*, 2006; Isidoro *et al.*, 2006; Lecina *et al.*, 2009) y de los efluentes de regadío (Lecina *et al.*, 2010), además de incrementar la producción entre un 25 y un 50% (Lecina *et al.*, 2009). Por ejemplo, la salida de nitratos en los efluentes de las áreas modernizadas es de 31 kg ha^{-1} frente a 68 kg ha^{-1} en las áreas con regadío por gravedad (Tedeschi *et al.*, 2001; Cavero *et al.*, 2003; Isidoro *et al.*, 2006). No obstante, debe tenerse en cuenta que el agua que fluye como efluentes o excedentes de riego muestra una mayor concentración de sales y nitratos, precisamente en un periodo, el verano, en que los ríos que reciben los excedentes (Alcanadre y Flumen) circulan con caudales naturales más bajos.

Paralelamente al proceso de modernización, que ha representado importantes inversiones y endeudamientos por parte de los agricultores, ha tenido lugar un cambio en los tipos de cultivo, destacando el maíz y la alfalfa (Figura 9), seguidos por la soja, de implantación relativamente reciente, las endivias y otros cultivos altamente



Figura 9. El maíz se ha convertido en uno de los cultivos preferentes en Riegos del Alto Aragón tras la modernización, ocupando frecuentemente parcelas muy extensas por concentración de otras mucho menores. Su elevada productividad se complementa en ocasiones con el cultivo de un cereal de invierno (cebada o trigo) entre octubre y principio de junio.
Figure 9. Maize has become one of the main crops in Riegos del Alto Aragón after modernization, frequently occupying large plots due to concentration of many other minor plots. Sometimes, its high productivity is complemented with the cultivation of winter cereals (barley, wheat) between October and the beginning of June.

consumidores de agua. El resultado final enfrenta a los gestores y agricultores de R.A.A. a una gran paradoja: la modernización, que pretendía “racionalizar” el consumo de agua, ha representado un espectacular incremento en su demanda, dado que se han sustituido rápidamente los cereales de invierno por cultivos de verano, naturalmente más necesitados de agua de riego y sometidos a mayor evapotranspiración (Martínez Cob *et al.*, 1998; Playán & Mateos, 2006; Lecina *et al.*, 2010). Incluso muchos agricultores producen dos cosechas al año: cebada o trigo de noviembre a mayo/junio, y maíz de junio a octubre o noviembre. Se llega así a producir en torno a 6.000 kg ha⁻¹ de cereales de invierno y entre 12.000 y 16.000 kg ha⁻¹ de maíz. Mientras tanto se ha mantenido, aunque con tendencia decreciente, el cultivo de arroz en áreas abancaladas localizadas preferentemente en fondos de valle (Figura 10) donde se registra una mayor concentración de salinidad. Esto ha significado un cambio muy importante en los consumos de agua por hectárea, pasado de 3.100-3.800 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en los cereales de invierno, a 8.500 m³ ha⁻¹ en el maíz, 10.250 m³ ha⁻¹ en alfalfa y 13.100 m³ ha⁻¹ en arroz (Cazcarro & Sánchez, 2009), valores a los que se deberían descontar las salidas como efluentes derivados hacia los canales de drenaje y la red fluvial. Esta información se ha elaborado a partir de la Tabla 2 de Cazcarro & Sánchez Chóliz (2008). Un resumen de esta información puede encontrarse en Cazcarro & Sánchez (2009).

La modernización del regadío no ha sido ajena a la expansión de la ganadería intensiva (granjas de ganado porcino, producción de pollos y huevos y vacuno de engorde), que ha permitido incrementar el valor añadido de



Figura 10. Desde el principio de Riegos del Alto Aragón se ha mantenido el cultivo de arroz, generalmente en fondos de valle cuyos suelos pueden alcanzar una salinidad relativamente alta, en parcelas abancaladas que permiten la presencia permanente de una lámina de agua. Sin embargo, la última década muestra una tendencia decreciente en la extensión ocupada por el cultivo del arroz, debido a su mayor consumo de agua, aunque contribuye a la diversidad paisajística y biológica de los nuevos regadíos.

Figure 10. Since the beginning of Riegos del Alto Aragón, rice has been continuously cultivated, generally in valley bottoms whose soils can reach a relatively high salinity, on terraced plots that allow the permanent presence of a water sheet. However, the last decade shows a declining trend in the extend occupied by rice cultivations, due to its high water consumption, although it contributes to the landscape and biological diversity in the new irrigated lands.

la producción de maíz, cebada y alfalfa, especialmente entre los pequeños y medianos propietarios de tierras de cultivo (García Ruiz *et al.*, 2003). En cambio, la presencia de cultivos hortícolas no ha despuntado como hubiera cabido esperar por su elevado valor añadido, en parte debido a la falta de mano de obra, la escasez de empresas de transformación y la ausencia de mercados organizados con el objetivo específico de impulsar la producción y comercialización. Destaca, no obstante, la presencia de cultivos como la endivia, el ajo y la cebolla, que están controlados y comercializados por empresas de fuera de Aragón, aunque los trabajos son llevados a cabo por los propietarios del terreno.

La consecuencia inmediata de la modernización es la necesidad de disponer de mayores reservas de agua, para lo que se ha procedido a aumentar la capacidad interna de embalsado de R.A.A., con la construcción de pequeños embalses (Torrollón, 1,83 hm³; Valdabrá, 2,9 hm³; Las Fitas, 9 hm³, y Lasesa, 6 hm³). Además, se han construido casi 350 balsas, especialmente a lo largo del siglo XX, sobre todo en el sector central y oriental del área de R.A.A., alguna con hasta 1 hm³ de capacidad (Figura 11). La construcción de balsas ha sido una estrategia reciente para (i) aumentar la capacidad interna de almacenamiento de agua; (ii) flexibilizar la distribución del riego, dado que existe una respuesta casi inmediata frente a la demanda de



Figura 11. La modernización de Riegos del Alto Aragón ha conducido a la construcción de balsas que permiten incrementar las reservas internas de agua y favorecen el riego por aspersión, aunque obligan a un mayor consumo de energía. Además, las balsas dan lugar a una mayor flexibilidad en el uso del agua por parte de los regantes. En la imagen, balsa de Peraltilla.

Figure 11. The modernization of Riegos del Alto Aragón has led to the construction of ponds that increase water reserves and favour sprinkler irrigation, although they require increasing energy consumption. Besides, the ponds give rise to greater flexibility in the use of water by irrigators. In the image, the 'Peraltilla' irrigation pond.

los agricultores; y (iii) aumentar la presión del agua para facilitar el riego por aspersión (Abad-Piracés, 2010; Jlali *et al.*, 2016). En total, entre los pequeños embalses y las balsas se ha incrementado la capacidad de almacenamiento de agua en unos 30 hm³. Las simulaciones de la gestión del sistema de R.A.A. demuestran que la construcción de balsas mejora todos los indicadores de sostenibilidad del sistema (Beguiría *et al.*, 2022b). La simulación también muestra, sin embargo, que en varios de los sectores en que se divide R.A.A. se ha alcanzado ya la capacidad óptima de almacenamiento interno, mientras que en otras (Canal del Cinca, Canal del Flumen y Canal de Monegros I-2) todavía queda margen de ampliación.

Por otro lado, las balsas representan un problema adicional: para aumentar la presión del agua se deben utilizar sistemas de bombeo que consumen electricidad. Esto no solo incrementa los costes de producción; también obliga a muchos agricultores a regar durante la noche para aprovechar los mejores precios de la electricidad.

7. Discusión: Una perspectiva global sobre los grandes problemas actuales en R.A.A.

La concepción inicial y posterior evolución de R.A.A. sugiere que estamos ante un sistema cuya complejidad ha aumentado en las últimas décadas. Paralelamente, se ha incrementado la dependencia de los recursos hídricos

generados en la montaña y de los mercados nacionales e internacionales. Varios son los problemas a los que se han tenido que enfrentar los agricultores de R.A.A.:

(i) El largo tiempo transcurrido en la construcción de las infraestructuras y en la transformación del secano en regadío. Esto ha obligado a cambios de estrategia y en las dotaciones de agua para riego, a la vez que ha contribuido a desestabilizar a los agricultores por la inconsistencia en la gestión y en los apoyos recibidos desde los responsables políticos e incluso desde el conjunto de la sociedad. Los grandes cambios experimentados por los nuevos regadíos desde el último tercio del siglo XX han mejorado mucho la imagen de R.A.A. y han aumentado muy claramente la productividad y la eficiencia del sistema, pero han supuesto esfuerzos añadidos para los agricultores. Estos últimos han tenido que adaptarse a cambios tecnológicos y de cultivos, a la vez que aumentan su dependencia financiera y energética. Los cambios en el proyecto inicial a lo largo de muchas décadas de construcción de las infraestructuras y los cambios más recientes, tanto tecnológicos como de cultivos, dan una notable impresión de desorganización y han generado incertidumbre en los agricultores, que no son en absoluto responsables de los problemas que se derivan de la forma en que se ha llevado a cabo la transformación del secano en regadío (García Ruiz *et al.*, 2003).

(ii) El incremento constante de la demanda de agua, relacionada con el proceso de modernización, que ha consistido en incorporar sistemas de riego más eficientes y a la vez cultivos más consumidores de agua. Este aumento de la demanda no se ha visto correspondido por un aumento de la oferta, de manera que las pretensiones de los agricultores de disponer de más embalses en los ríos pirenaicos no se han visto satisfechas por varias razones. En primer lugar, porque no hay ya muchos lugares en el Pirineo adecuados para la construcción de grandes presas y, en segundo lugar, por la fuerte presión en contra de la construcción de nuevos embalses por parte de los habitantes de la montaña y de la sociedad en general, así como de organizaciones conservacionistas. Este es un aspecto muy importante de cara al futuro de R.A.A.: Ni en estos momentos ni a más largo plazo existen posibilidades reales de ampliar la disponibilidad de recursos hídricos mediante la construcción de nuevos embalses en los ríos pirenaicos, de manera que insistir en este asunto no solo es un ejercicio inútil, sino que además crea una imagen de los agricultores que no es positiva sobre sus relaciones con las cuestiones medioambientales. Esta es una cuestión que debe quedar zanjada. En cambio, es posible aumentar la capacidad interna de almacenamiento de agua. Se ha conseguido con la construcción de pequeños embalses dentro del área directamente afectada por R.A.A. y, de manera especial, con la construcción de balsas. La suma total de la capacidad de esos embalses y la de las balsas equivale a la de un embalse de mediano tamaño, como el embalse de Biscarrués, que parece definitivamente descartado. La construcción de otro embalse de mayor envergadura como el de Almúdevar (169,7 hm³), también en el ámbito de R.A.A., es decir, en plena Depresión del Ebro, aumenta la capacidad de reservas hídricas, aunque agudi-

za el problema de los costes energéticos (Frutos Mejías *et al.*, 2008; Rocamora *et al.*, 2013; Jlassi *et al.*, 2016). Si tales costes habían aumentado mucho con la construcción de las balsas, ahora lo hacen mucho más dado que el agua que se almacenará en el embalse de Almodévar deberá ser bombeada desde el embalse de la Sotonera, abastecido por el río Gállego. Se ha previsto la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas, pero es evidente que R.A.A. verá cómo se encarecen inevitablemente los costes de producción.

A este respecto, no debe olvidarse que los agricultores han sido sujetos pasivos de las tensiones y desequilibrios que se han generado en R.A.A. debido a los cambios en las expectativas sobre la disponibilidad de recursos hídricos, la lentitud de las obras y los costes que han tenido que soportar para atender a la modernización (concentración parcelaria, construcción de balsas, instalación de nuevos sistemas de riego por aspersión o goteo) (Abad-Piracés, 2010; Jlassi *et al.*, 2016). Estos problemas han dejado a los agricultores en una posición de inestabilidad o de crisis que no siempre ha sido considerada de manera adecuada por parte del conjunto de la sociedad. De hecho, han sido acusados sucesivamente de hacer un uso abusivo del agua, de favorecer la desestabilización de la agricultura y la ganadería de montaña, de deteriorar los suelos en las áreas regadas o de contribuir a su salinización, y de empeorar la calidad de las aguas de los ríos aguas abajo de los regadíos. Esto ha sido cierto en algunos casos, pero son problemas derivados de la mala concepción del proyecto desde el principio y en otros casos de una gestión que no ha acabado de entender los cambios que se han venido produciendo en el conjunto de la sociedad.

Asistimos, pues, a un aumento de la demanda de agua debida a la modernización del regadío y a la posibilidad de producir dos cosechas al año (Lecina *et al.*, 2009, 2010; Playán & Mateos, 2006; Sánchez-Chóliz & Sarasa, 2013), además del incremento del consumo de agua relacionado con la expansión de la ganadería intensiva. Esta evolución debe considerarse lógica, dado que las grandes inversiones que acompañan a la modernización tienen que compensarse con una mayor productividad por unidad de superficie y una tendencia hacia la intensificación. Por otro lado, en la década de 1980, y más aún a lo largo del siglo XXI, tiene lugar una clara sustitución generacional en los regantes, incorporándose agricultores más jóvenes que son los que dan el paso para introducir nuevos cultivos y marginar sistemas de riego que han ido convirtiéndose en residuales.

Actualmente, se considera que el sistema se encuentra en un equilibrio satisfactorio de oferta y demanda de agua excepto en años extremadamente secos. Sin embargo, la tendencia observada y predicha en los recursos hídricos amenaza este equilibrio y puede reducir la resiliencia de las explotaciones y su viabilidad a largo plazo (Haro-Monteagudo *et al.*, 2020; Beguería *et al.*, 2022b). No debe olvidarse que las proyecciones de la temperatura reflejan, sin lugar a dudas, un incremento de la evapotranspiración (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; García-Garizábal *et al.*, 2014) y un descenso en la humedad relativa (Vicente-

Serrano *et al.*, 2014), lo que conduce a una mayor demanda de agua por los cultivos. Esto se une a la expansión de la vegetación en antiguos campos de cultivo y áreas de pastoreo extensivo, lo que está ya reduciendo la capacidad de las laderas de montaña para generar escorrentía. Estas tendencias se manifiestan de manera evidente en la evolución de los caudales de los ríos pirenaicos (Beguería *et al.*, 2003; García-Ruiz *et al.*, 2011; Zabaleta *et al.*, 2022) y, en general en las cabeceras de los ríos de la región mediterránea (Morán-Tejeda *et al.*, 2012; Martínez-Fernández *et al.*, 2013). No hay solución sencilla a este problema complejo, que necesita la adopción de medidas sobre la organización del paisaje, incluyendo el desbroce o aclareo de aquellas superficies cubiertas de matorral en laderas poco pendientes y la creación de un paisaje en mosaico con áreas de bosque, otras cubiertas de pasto y algunos campos cultivados que, en conjunto, permitan una mayor generación de escorrentía sin incrementar el riesgo de erosión y a la vez favorezcan el desarrollo de la ganadería extensiva y limiten el riesgo de incendios (Lasanta *et al.*, 2019; García-Ruiz *et al.*, 2020b).

A ello debe añadirse el aterramiento de los embalses, que amenaza con reducir de manera lenta pero constante su capacidad de almacenamiento de agua (Valero-Garcés *et al.*, 1998; López Moreno *et al.*, 2003; Casamor & Calafat, 2018). Por otro lado, el régimen de almacenamiento y fusión de la nieve en la alta montaña pirenaica está cambiando notablemente, de manera que disminuye la cantidad de nieve retenida en las cabeceras fluviales y se adelanta un mes el periodo de fusión (López-Moreno *et al.*, 2004; Morán-Tejeda *et al.*, 2014; Zabaleta *et al.*, 2022), obligando a cambios en los sistemas de gestión de los embalses pirenaicos debido al adelantamiento de los caudales más elevados y a la anticipación del periodo de estiaje (López-Moreno *et al.*, 2004). Estas tendencias sugieren que en el futuro aumentarán las tensiones sobre los recursos hídricos, y que los agricultores deben estar preparados para soportar restricciones en la cantidad de agua distribuida por hectárea. Es cierto que el embalse de Almodévar va a paliar los problemas a corto plazo, pero la estrategia de ampliar la superficie regada debe cuestionarse con el fin de estabilizar la oferta y la demanda de agua y evitar tensiones añadidas a medio-largo plazo.

8. Conclusiones

1. La evolución de R.A.A. refleja la complejidad de un sistema que ha cambiado mucho desde su planteamiento inicial. Se ha transformado el diseño de las infraestructuras y han cambiado los objetivos del regadío, así como la morfología del parcelario y los tipos de cultivo, a la vez que se han introducido nuevos sistemas de riego y sistemas informáticos para la toma de decisiones. Esta ha sido la llamada modernización, que en contra de lo que pudiera pensarse ha incrementado los consumos de agua por hectárea, debido a la incorporación de nuevos cultivos de verano que aumentan la evapotranspira-

- ción y el consumo de agua. Es importante, no obstante, tener en cuenta que la utilización de riego por aspersión y goteo ha disminuido mucho el volumen de los efluentes de regadío, de manera que la modernización ha representado un uso más eficiente del agua. Sin duda, este proceso ha contribuido en gran medida a mejorar la imagen de los regantes y a revalorizar su función social y económica.
2. Estos cambios han supuesto esfuerzos adicionales para los agricultores, que han tenido que adaptarse a cambios tecnológicos y de cultivos, a la vez que dependen cada vez más de nuevos procedimientos que aumentan la dependencia financiera y energética de los propios agricultores. Los cambios en el proyecto inicial a lo largo de muchas décadas de construcción de las infraestructuras y los cambios más recientes, tanto tecnológicos como de cultivos, dan una notable impresión de desorganización y a la vez de incertidumbre para los regantes, que no son responsables de los problemas que se derivan de la forma en que se ha llevado a cabo la transformación del secano en regadío.
 3. El sistema de R.A.A., que hasta ahora ha mantenido un equilibrio entre oferta y demanda de agua, ha alcanzado una situación límite que no permite incrementar la superficie regada. Frente a la política de expansión del regadío, no puede olvidarse una evidencia irrefutable: los recursos hídricos, obtenidos a partir del agua acumulada en los embalses situados en las cuencas de los ríos Gállego y Cinca, han alcanzado su límite. Es cierto que el nuevo embalse de Almudévar, cuya inauguración está prevista para 2023, aliviará las crecientes tensiones respecto a la demanda de agua, pero la política de seguir reclamando más embalses es social y ambientalmente insostenible, de manera que los agricultores de R.A.A. harán bien en asumir esa limitación de los recursos y centrar los esfuerzos en mejorar la utilización de los mismos para aumentar el rendimiento por volumen de agua utilizada.
 4. Es también imprescindible que tanto los gestores de R.A.A. como los regantes sean plenamente conscientes de los cambios que, cada vez con menos dudas, se van a producir en la disponibilidad de los recursos hídricos. Los estudios sobre la evolución de la temperatura a lo largo del siglo XX, la acumulación de nieve en alta montaña y la constante tendencia al incremento de la densidad de bosques y matorrales apuntan todos en la misma dirección: un descenso en la capacidad de generación de escorrentía en las zonas de cabecera de los ríos Cinca y Gállego y caudales cada vez más bajos, aspecto éste que se viene observando desde hace algunas décadas. Las predicciones sobre la evolución de la precipitación, aunque con un elevado grado de incertidumbre en cuanto a su magnitud, son mayoritariamente negativas, contribuyendo a acentuar la presión sobre los recursos hídricos en el futuro. Además, la retención de sedimento en los embalses del sistema de R.A.A. se traduce en un progresivo descenso en su capacidad de almacenamiento. Este problema es, por otra parte, imposible de resolver, al menos con la tecnología actual. La necesidad de reducir la cantidad de sedimento que llega a los embalses en periodos de avenida ha de ser un objetivo prioritario, cuya estrategia debería basarse en un profundo conocimiento de las áreas de cabecera para reducir la accesibilidad del sedimento a los cauces mediante el aumento de la vegetación en lugares especialmente sensibles a la erosión. Una vez más se confirma la interdependencia entre las áreas de montaña y los piedemontes y tierras bajas (en este caso, la Depresión del Ebro) para entender el funcionamiento global del territorio y optimizar el funcionamiento de los regadíos sin afectar negativamente a la montaña ni debilitar las demandas de los agricultores.
 5. El cambio climático, representado por el aumento de la temperatura media y de la ocurrencia de periodos más intensos y prolongados de estiajes y un probable aumento de las sequías, implicará con una alta probabilidad un incremento en las necesidades de riego de los cultivos. Ello se debe a tres tipos de factores: (i) el alargamiento de la estación de riego, que se adelantará con respecto a las condiciones actuales debido al aumento de la temperatura y de la evaporación; (ii) el incremento de las necesidades de los cultivos como resultado de la mayor capacidad desecante (demanda hídrica) de una atmósfera más cálida y seca; y (iii) la implantación de cultivos industriales y hortofrutícolas que, en algunos casos, implican un mayor consumo de agua. Este último factor está relacionado con la necesidad de intensificar la productividad de los regadíos.
 6. La creciente limitación en la disponibilidad de los recursos hídricos obligará a la Administración regional y a los regantes a incentivar ciertos cultivos con mayor valor añadido, aunque seguramente más dependientes de mano de obra y de sistemas de gestión del agua y del riego aún más eficientes. La implantación de agroindustrias en el área de R.A.A. es un problema pendiente de resolver, en el que no ha habido suficiente implicación por parte de la Administración, pero es un objetivo insoslayable para fijar población directa e indirectamente implicada en la agricultura de regadío y para incrementar la productividad de todo el sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de los siguientes proyectos: (1) EFA210/16/PIRAGUA, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del programa interregional V Francia-España-Andorra (POCTEFA 2014-2020) de la Unión Europea; (2) CA_CC_2018, financiado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto De-

mográfico del Gobierno de España; y (3) MANMOUNT (PID2019-105983RB-I00/AEI/10.13039/501100011033, financiado por el MICCN-FEDER.

Referencias

- Abad Piracés, J., 2010. Problemática de la modernización de regadíos en las comunidades de regantes. *XII Congreso Nacional de Comunidades de Regantes de España*, 36 pp., Tarragona.
- AEMET, 2017. *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Madrid, Agencia Estatal de Meteorología. http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Guia_escenarios_AR5/Guia_escenarios_AR5.pdf (último acceso: julio de 2020).
- Andréassian V., 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1-2): 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>.
- Andreu, M., Bernal, M., Novellón, L., Pedrocchi, C., Sesé, J.A., 1996. Enclaves florísticos de interés en la Sierra de Lanaja. *Lucas Mallada*, 8: 217-221.
- Batalla, R.J., Vericat, D., 2011. An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro basin. *Journal of Soils and Sediments*, 11: 1070-1081. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0378-8>.
- Beguiría, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M., 2003. Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32 (4): 283-286.
- Beguiría S., Caballero, Y., Le Cointe, P., Palazón, L., 2022a. Los recursos hídricos de los Pirineos y su importancia regional. En S. Beguería (Edr.), *Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros*. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1.
- Beguiría S., Sans, F., Antigüedad, I., Cakir, R., Domènech, M., Haro-Montegudo, D., Huang, P., Jodar, J., Lambán, L.J., Le Coent, P., Le Roux, G., Llasat, M.C., Llasat-Botija, M., Meaurio, M., Palazón, L., Pardo, E., Pons, M., Sauquet, E., Travesset, O., Uriarte, J., Valiente, M., Vidal, J.P., Zabaleta A., 2022b. *Adaptación al cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de los Pirineos [Informe]*. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 2. <http://hdl.handle.net/10261/271868>.
- Bolea Foradada, J.A., 1986. *Los riegos de Aragón*. Grupo Parlamentario Aragonés Regionalista de las Cortes de Aragón, 579 pp., Huesca.
- Box Amorós, M., 1992. El regadío medieval en España: época árabe y conquista cristiana. In: A. Gil Olcina, A. Morales Gil (Coords.), *Los hitos históricos de los regadíos españoles*. Ministerio de Agricultura, pp. 49-90, Madrid.
- Bouzaïda, M.A., Frutos, L.M., 2006. Las repercusiones de las reformas agrarias del Plan de Riegos del Alto Aragón en la población de la comarca aragonesa de Los Monegros. *Investigaciones Geográficas*, 40: 35-53.
- Braum-Blanquer, J., Bolós, O. de, 1987. *Las comunidades vegetales de la Depresión del Ebro y su dinamismo*. Reedicción de la Delegación de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Zaragoza, 278 pp., Zaragoza.
- Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J., 2014. Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. *Journal of Soils and Sediments*, 14: 1921-1937. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0956-7>.
- Butzer, K.W., Mateu Bellés, J.F., Butzer, E.K., Kraus, P., 1989. L'origen dels sistemes de regadiu al País Valencià: romà o musulmà? *Afers: Fulls de Recerca I Pensament*, 7: 9-68.
- Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., LeMoigne, P., Lehenaff, A., Boone, A., 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne River basin to climate change. *Water Resources Research*, 43 (7), <https://doi.org/10.1029/2005WR004192>.
- Casamor, J.L., Calafat, A., 2018. El problema del aterramiento de embalses y el cálculo de las reservas hidráulicas. *Tierra y Tecnología*, 52. <http://dx.doi.org/10.21028/jlc.2018.10.01>.
- Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R., 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River basin: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117: 451-461. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-0763-8>.
- Causapé, J., Merchán, B., Abrahão, R., García-Garzabal, I., 2012. Alteración hidrológica del barranco de Lerma (Zaragoza) por la transformación del regadío. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38 (2): 91-106. <https://doi.org/10.18172/cig.1284>.
- Cavero, J., Beltrán, A., Aragüés, R., 2003. Nitrate exported in the drainage water of two sprinkler irrigated watersheds. *Journal of Environmental Quality*, 32: 916-926. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.9160>.
- Cazcarro, I., Sánchez Chóliz, J., 2008. *Agua virtual y huella del agua en la economía de la provincia de Huesca*. CGRAA, Huesca.
- Cazcarro, I., Sánchez, J., 2009. Agua virtual azul, y agua virtual azul en la economía de Huesca. *Boletín de Riegos del Alto Aragón*, 25: 6-12.
- Chueca, J., Julián, A., López-Moreno, J.I., 2007. Recent evolution (1981-2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors. *Journal of Glaciology*, 53: 547-557. <https://doi.org/10.3989/0022143077844409342>.
- CLIMPY-OPCC, 2022. Geoportel del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), <https://opcc-ctp.org/geoportel>, consultado en junio de 2022.
- Conde Oria, F., 2019. *El pantano del Ebro: Un laboratorio para la didáctica de la Geografía*. Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Cantabria, 50 pp., Santander.
- De Bernardo Stempel, P., 2007. Water in the Botorrita bronzes and other inscriptions. *Palaeohispanica*, 7: 55-69.
- Del Barrio, G., Creus, J., Puigdefàbregas, J., 1990. Thermal seasonality of the high mountain belts of the Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 10 (3): 227-233.
- Faci, J.M., Bensaci, A., Slatni, A., Playán, E., 2000. A case study for irrigation modernization. I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agricultural Water Management*, 42: 313-334. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00045-1)
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JCR, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rome, Italy; IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fernández-García, A.J., Martín-Vide, J., 2004. Tendencias de los patrones de circulación estival en Europa occidental en la segunda mitad del siglo XX. Precipitaciones estivales asociadas en la Península Ibérica. *IV Congreso de la Asociación Española de Climatología*, 273-293 pp., Santander.
- Fernández Marco, J.I., 1961. *El Canal Imperial de Aragón. Estudio Geográfico*. Instituto de Geografía Aplicada, CSIC, 179 pp., Zaragoza.
- Frutos, L.M., 1976. *Estudio Geográfico del Campo de Zaragoza*. Institución Fernando El Católico, 342 pp., Zaragoza.
- Frutos Mejías, L.M., Castelló Puig, A., Hernández Navarro, M.L., Ruiz Budría, E., 2008. La modernización de los regadíos en Aragón. Acciones y perspectivas. En: J.M. Gómez Espín, R. Martínez Medina (Coord.), *Los espacios rurales españoles en el nuevo siglo. Actas del XIV Coloquio de Geografía Rural*. Murcia, Asociación de Geógrafos Españoles y Universidad de Murcia, 111-125 pp.

- García-Garizábal, I., Causapé, J., Abrahao, R., Merchan, D., 2014. Impact of climate change on Mediterranean irrigation demand: historical dynamics of climate and future projections. *Water Resources Management*, 28: 1449-1462. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0565-7>
- García-Ruiz, J.M., 2011. Una revisión de los procesos de sufo- sión o *piping* en España. *Cuadernos de Investigación Geo- gráfica*, 37 (1): 7-24. <https://doi.org/10.18172/cig.1243>
- García Ruiz, J.M., López Bermúdez, F., 2009. *La erosión del suelo en España*. Sociedad Española de Geomorfología, 441 pp., Zaragoza.
- 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 re- view. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140: 317- 338. <https://doi.org/10.1016/agee.2011.01.003>.
- García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Alberto, F., 1997. Soil erosion by piping in irrigated fields. *Geomorphology*, 20: 269-278. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00028-7).
- García Ruiz, J.M., Lasanta, T., Biarge, F., 2003. *Agua, tierra y paisaje. Complejidad y diversidad en el territorio de Rie- gos del Alto Aragón*. Confederación Hidrográfica del Ebro y Comunidad General de Riegos del Alto Aragón, 164 pp., Huesca, Zaragoza.
- García Ruiz, J.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., 2001. *Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente*. Geoforma Edicio- nes, 192 pp., Logroño.
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105: 121-139. <https://doi.org/10.1016/j.earsci- rev.2011.01.006>.
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Se- rrano, S.M., González-Sampérez, P., Valero-Garcés, B.L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Gómez-Villar, A., 2015. Efectos geocológicos del Cam- bio Global en el Pirineo Central Español: Una revisión a dis- tintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos* 170, e012. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170005>.
- García-Ruiz, J.M., Tomás-Faci, G., Diarte-Blasco, P., Montes, L., Domingo, R., Sebastián, M., Lasanta, T., González-Sam- pérez, P., López-Moreno, J.I., Arnáez, J., Beguería, S., 2020a. Transhumance and long-term deforestation in the subalpine belt of the central Spanish Pyrenees: An interdisciplinary approach. *Catena*, 195: 104744. <https://doi.org/10.1016/j. catena.2020.104744>.
- García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Lana-Ren- ault, N., Álvarez-Farizo, B., 2020b. Rewilding and resto- ring cultural landscapes in Mediterranean mountains : Op- portunities and challenges. *Land Use Policy*, 99 : 104850. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104850>
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Develop- ment, Applications, and Future Research Directions. *Tran- sactions of the ASABE*, 50 (4) : 1211-1250. <https://doi. org/10.13031/2013.23637>.
- Germán Zubero, L., 2003. Agua y desarrollo económico en Ara- gón. En: *Uso y gestión del Agua en Aragón*. Consejo Econó- mico y Social de Aragón, 177-200 pp., Zaragoza.
- Gómez Mendoza, J., 1992. Regeneracionismo y regadíos. In: A. Gil Olcina, A. Morales Gil (Coords.), *Los hitos históricos de los regadíos españoles*. Ministerio de Agricultura, 231–262 pp., Madrid.
- González-Hidalgo, J.C., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Brun- netti, M., 2020. MOTEDAS century: A new high-resoluc- ion secular monthly maximum and minimum temperature grid for the Spanish mainland (1916–2015). *International Journal of Climatology*, 40(12): 5308-5328. <https://doi. org/10.1002/joc.6520>.
- González-Sampérez, P., 2004. *Evolución paleoambiental del sector central de la Cuenca del Ebro durante el Pleistoceno Superior y Holoceno*. Instituto Pirenaico de Ecología y Departamento de Ciencias de la Antigüedad, 210 pp., Za- ragoza.
- Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., Beguería, S., 2020. Long- term sustainability of large water resource systems under climate change: A cascade modeling approach. *Journal of Hydrology*, 582: 124546.2020. <https://doi.org/10.1016/j.hy- dro.2010.124546>.
- Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., Zoumides, Ch., Beguería, S., 2022. Optimal Implementation of Climate Change Ad- aptation Measures to Ensure Long-Term Sustainability on Large Irrigation Systems. *Water Resources Management*, in press.
- Higuera, A., 1969. La agricultura de regadío en España. En: *Miscelánea a Canellas*. Universidad de Zaragoza, 585–630 pp., Zaragoza.
- Ibarra-Benlloch, P., Pinilla-Navarro, V., 1999. Regadío y trans- formaciones agrarias en Aragón (1880-1990). En: R. Garra- bau, J.M. Naredo (Eds.), *El agua en los sistemas agrarios: Una perspectiva histórica*. Fundación Argentaria, 391–426 pp., Madrid,
- Ibarra, P., de la Riva, J., 2006. El medio físico de la zona de Riegos del Alto Aragón. En: L. Germán (Coord.), *Riegos del Alto Aragón. Impacto económico y social 1953-2003*. Comunidad de Riegos del Alto Aragón, 15–53 pp., Huesca.
- Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R., 2006. Environmental im- pact of irrigation in La Violada district (Spain): II. Nitrogen fertilization and nitrate export patterns in drainage water. *Journal of Environmental Quality*, 35: 776–785. <https://doi. org/10.2134/jeq2005.0064>.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole- filled SRTM for the globe Version 4. Available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database <http://srtm.csi.cgiar. org/>, 15: 25-54.
- Jlassi, W., Nadal-Romero, E., García-Ruiz, J.M., 2016. Modern- ization of new irrigated lands in a scenario of increasing wa- ter scarcity: from large reservoirs to small ponds. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42 (1): 233–259. <https://doi. org/10.18172/cig.2918>.
- Laliena, C., 2008. Agua y progreso social en Aragón, siglos XII-XVIII. En *¿Agua pasada? Regadíos en el Archivo Histórico Provincial de Zaragoza*. Gobierno de Aragón, 53–84 pp., Zaragoza.
- Lana-Renault, N., Alvera, B., García-Ruiz, J.M., 2011. Run- off and sediment transport during the snowmelt period in a Mediterranean high-mountain catchment. *Arctic, An- tarcctic, and Alpine Research*, 43 (2): 213–222. <https://doi. org/10.1657/1938-4246-43.2.213>.
- Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Serrano-Muela, M.P., Al- vera, B., Sánchez-Navarrete, 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 Process- es and Landforms*, 39: 581–592. <https://doi.org/10.1002/ esp.3465>.
- Lasanta, T., 1988. The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 132: 15–36.
- Lasanta, T., 1989. *Evolución reciente de la agricultura de mon- taña: el Pirineo aragonés*. Geoforma Ediciones, 220 pp., Logroño.
- Lasanta, T., 2009. Cambios de función en los regadíos de la Cuenca del Ebro: Un análisis del papel de los regadíos a lo largo del tiempo. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 50: 81–110.

- Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S.M., Cuadrat-Prats, J.M., 2005. Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Pyrenees. *Applied Geography*, 25(1): 47–65. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2004.11.001>.
- 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.
- Lasanta, T., Pérez-Rontomé, M.C., Machín, J., Navas, A., Mosch, W., Maestro, M., 2001. La exportación de solutos en un polígono de regadío de Bardenas (Zaragoza). *Cuatrenario y Geomorfología*, 15(3-4): 51–66.
- Lasanta, T., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., 2006. Geomorphic and hydrological effects of traditional shifting agriculture in a Mediterranean mountain area, Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 26(2): 146–152. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2006\)26\[146:GAHEOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2006)26[146:GAHEOT]2.0.CO;2).
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., García-Ruiz, J.M., 2019. Clearing shrubland as a strategy to encourage extensive livestock farming in the Mediterranean mountains. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(2): 487–513. <https://doi.org/10.18172/cig.3616>
- Lasanta, T., Arnáez, J., Pascual, N., Ruiz-Flaño, P., Errea, M.P., Lana-Renault, N., 2017. Space-time process and drivers of land abandonment in Europe. *Catena*, 149(3): 810–823. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.024>.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R., 2009. *Efecto de la modernización de regadíos sobre la cantidad y la calidad de las aguas: La cuenca del Ebro como caso de estudio*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 90 pp., Madrid.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R., 2010. Irrigation modernization and water conservation in Spain. The case of Riegos del Alto Aragón. *Agricultural Water Management*, 97: 1663–1675.
- López Gómez, A., 1974. El origen de los riegos valencianos. Los canales romanos. *Cuadernos de Geografía*, 15: 1–24.
- López-Moreno, J.I., 2005. Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2): 253–260.
- López Moreno, J.I., Beguería, S., García Ruiz, J.M., 2000. El régimen del embalse de Yesa (cuenca alta del río Aragón, Pirineo Central) y su adaptación a la variabilidad del régimen fluvial. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26: 131–145.
- López Moreno, J.I., Beguería, S., Valero Garcés, B., García Ruiz, J.M., 2003. Intensidad de las avenidas y aterramiento de embalses en el Pirineo Central español. *Éria*, 61: 159–168.
- 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 (5): 787–802.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., 2004. The management of a large Mediterranean reservoir: Storage regimens of the Yesa Reservoir, Upper Aragón River Basin, Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 34 (4): 508–515.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M., 2008a. Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and predictions over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology*, 28: 1535–1550. <https://doi.org/10.1002/joc.1645>.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M., Alvera, B., 2008b. Sensitivity of the snow energy balance to climatic changes: prediction of snowpack in the Pyrenees in the 21st century. *Climate Research*, 36: 203–217. <https://doi.org/10.3354/cr00747>.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Kenawy, A., 2010. Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955–2006. *International Journal of Climatology*, 30: 1026–1041. <https://doi.org/10.1002/joc.1945>.
- López-Moreno, J.I., Pomeroy, J.W., Revuelto, J., Vicente-Serrano, S.M., 2013. Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 27: 2637–2650. <https://doi.org/10.1002/hyp.9408>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169004>
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M., 2015. 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., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S.M., Azorín Molina, C., Alonso-González, E., García-Ruiz, J.M., 2016. Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere*, 10: 681–694. <http://doi.org/10.5194/tc-10-681-2016>.
- López-Moreno, J.I., Soubeyrou, J.M., Gascoin, S., Alonso-González, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C., Morin, S., 2020. Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 40(14), 61226136. <https://doi.org/10.1002/joc.6571>.
- Llorens, P., Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335: 37–54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>.
- Manzano Moreno, E., 1986. El regadío en al-Andalus: Problemas en torno a su estudio. *La España Medieval*, Tomo V. Editorial de la Universidad Complutense: 617–632 pp., Madrid.
- Martínez Cob, A., Faci, J.M., Bercero Bercero, A., 1998. *Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón*. Institución Fernando El Católico, 223 pp., Zaragoza.
- Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., Herrero-Jiménez, C.R., 2013. Recent trends in rivers with near-natural flow regime. The case of the river headwaters in Spain. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37(5). <https://doi.org/10.1177/0309133313496834>.
- Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S., Servat, E., 2013. Assessing the capacity of water resources to meet current and future water demands over the Ebro catchment (Spain). *IAHS Publ.*, 362: 199–206.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2000. *Libro Blanco del Agua en España*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 84- 8320-128-3, Madrid.
- Montserrat, P., 1988. *Flora. Enciclopedia temática de Aragón*, Tomo 6. Ediciones Moncayo, 323 pp., Zaragoza.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J.M., López-Moreno, J.I., 2012. Land cover changes and recent hydrological evolution in the Duero basin. *Regional Environmental Change*, 12: 17–33.
- Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., López-Moreno, J.I., Rahman, K., Beniston, M., 2014. Streamflow timing of mountain rivers in Spain: Recent changes and future projections. *Journal of Hydrology*, 517: 1114–1127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.053>.

- Nadal-Romero, E., García-Ruiz, J.M., 2018. Rethinking spatial and temporal variability of erosion in badlands. In: E. Nadal-Romero, J.F. Martínez-Murillo, Kuhn, N.J. (Eds.), *Badlands dynamics in the context of Global Change*. Elsevier: 217–253 pp., Amsterdam.
- Navas, A., Machín, J., 1997. Assessing erosion risks in the gypsumiferous steppe of Litigio (NE Spain). An approach using GIS. *Journal of Arid Environments*, 37: 433–441.
- Navas, A., Valero-Garcés, B., Gaspar, L., Machín, J., 2009. Reconstructing the history of sediment accumulation in the Yesa reservoir: an approach for management of mountain reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 25: 15–27. <https://doi.org/10.1080/07438140802714304>.
- Pedrocchi, C., Coord., 1998. *Ecología de los Monegros*. Instituto de Estudios Altoaragoneses, 430 pp., Huesca.
- Peña-Angulo, D., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Noguera, I., Tomás-Burguera, M., López-Moreno, J.I., Lorenzo-Lacruz, J., El Kenawy, A., 2021. Unravelling the role of vegetation on the different trends between climatic and hydrologic drought in headwater catchments of Spain. *Anthropocene*, 36: 100309. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100309>.
- Peña-Monné, J.L., Sampietro-Vattuone, M.M., Picazo, J.V., Longares, L.A., Pérez-Lambán, F., Badía, D., 2017. Application of geoarchaeological evolutionary models for the interpretation of complex archaeological structures in the central Ebro Basin (Spain). *Quaternary International*, 483: 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.046>.
- PIRAGUA-OPCC, 2022. Geoportel del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), <https://opcc-ctp.org/geoportel>, consultado en junio de 2022.
- Playán, E., Mateos, L., 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, 80: 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>.
- Playán, E., Cervero, J., Mantero, I., Salvador, R., Lecina, S., Faci, J.M., Andrés, J., Salvador, V., Cardeña, G., Ramón, S., Lacueva, J.L., Tejero, M., Ferri, J., Martínez-Cob, A., 2007. A database program for enhancing irrigation district management in the Ebro Valley (Spain). *Agricultural Water Management*, 87(2): 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.028>.
- Pons, M., López-Moreno, J.I., Rosas-Canals, M., Jover, E., 2015. The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate induced changes in the snowpack. *Climatic Change*, 131(4): 591–605. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1400-8>.
- Pueyo, Y., 2013. Aportación de los modelos ecohidrológicos con feedbacks al conocimiento del funcionamiento de los ecosistemas de zonas áridas y semi-áridas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 39(2): 243–258.
- Quintana-Seguí, P., Beguería, S., Barella, A., Cakir, R., Cenobio, O. (OE), Clavera-Gispert, R., Grusson, Y., Palazón, L., Sánchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., Vidal, J.P., 2022. Modelización del balance hídrico y los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático. En: S. Beguería (Ed.), *Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros*. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1.
- Quintana-Seguí, P., Turco, M., Herrera, S., Mínguez-Macho, G., 2017. Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrology and Earth System Science*, 21(4): 2187–2201.
- Rocamora, C., Voera, J., Abadía, R., 2013. Strategy for efficient energy management to solve energy problems in modernized irrigation: analysis of the Spanish case. *Irrigation Science*, 31: 1139–1158. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0394-5>.
- Ruiz Flaño, P., 1993. *Procesos de erosión en campos abandonados de los Pirineos*. Geoforma Ediciones, 191 pp., Logroño.
- Sánchez-Chóliz, J., Sarasa, C., 2013. Water resources analysis in Riegos del Alto Aragón (Huesca) in the first decade of the 21st Century. *Economía Agraria y Recursos Naturales - Agricultural and Resource Economics*, 13(1): 97–124. <https://doi.org/10.7201/earn.2013.01.05>.
- Sandonis, L., González-Hidalgo, J.C., Peña-Angulo, D., Beguería, S., 2021. Mean temperature evolution on the Spanish mainland, 1916–2015. *Climate Research*, 82: 177–189. <https://doi.org/10.3354/cr01627>.
- 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(3-4): 279–285. <https://doi.org/10.1659/mrd.0876>.
- Serrano-Muela, P., Regüés, D., Nadal-Romero, E., 2010. La variabilidad temporal de la respuesta hidrológica en una pequeña cuenca mediterránea forestada de los Pirineos Central. *Pirineos*, 165: 193–213. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165010>.
- Serrano-Muela, M.P., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., González-Hidalgo, J.C., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Sanjuan, Y., García-Ruiz, J.M., 2015. An exceptional rainfall event in the Central-Western Pyrenees: Spatial patterns in discharge and impact. *Land Degradation and Development*, 26: 249–262. <https://doi.org/10.1002/ldr.2221>.
- Sola Alonso, J.R., 2015. La tierra y el agua, constructores del Canal de Castilla. En: F. Jové Sandoval, J.L. Sáinz (Coords.). *Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra de Campos*, 149–160 pp., Valladolid.
- Stevenson, A., Macklin, M., Benavente, J., Navarro, C., Passmore, D., Davis, B., 1991. Cambios ambientales durante el Holoceno en el Valle del Ebro: sus implicaciones arqueológicas. *Cuaternario y Geomorfología*, 5: 149–164.
- Tedeschi, A., Beltrán, A., Aragüés, R., 2001. Irrigation management and hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro river basin (Spain). *Agricultural Water Management*, 49: 31–50.
- Valero-Garcés, B.L., Navas, A., Machín, J., Walling, D., 1998. Sediment sources and siltation in mountain reservoirs: a case study from the Central Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 28: 23–41.
- Valero-Garcés, B., Navas, A., Machín, J., Stevenson, A., Davis, B., 2000. Responses of a saline lake ecosystem in a semiarid region to irrigation and climate variability. The history of Salada Chiprana, Central Ebro Basin, Spain. *Ambio*, 29(6): 344–350. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00096-8).
- Van Beek, J., Van de Bilt, G., Van Hemert, H., Laen, P., Lont, K., 1991. *Silting up of the reservoir of Terradets and the contribution of its subcatchments*. Agricultural University, Wageningen, 72 pp., Wageningen.
- Vicente-Serrano, S.M., 2013. Spatial and temporal evolution of precipitation droughts in Spain in the last century. En: C. García-Legaz, F. Valero Rodríguez (Eds.), *Adverse weather in Spain*. Consorcio de Compensación de Seguros, pp. 283–296, Madrid.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., 2006. The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semi-arid climate gradient in northeast Spain. *International Journal of Climatology*, 26: 1427–1453.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., 2008. The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 113: D20120.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., 2007. La precipitación en el Pirineo español: diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos*, 162: 43–69.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010.

- A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index–SPEI. *Journal of Climate*, 23: 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Vicente-Serrano, S.M., Zouber, A., Lasanta, T., Pueyo, Y., 2012. Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid Mediterranean environments. *Ecological Monographs*, 82(4): 407-428. <https://doi.org/10.1890/11-2164.1>.
- Vicente-Serrano, S.M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., López-Moreno, J.I., Espejo, F., 2014. Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms. *Climate Dynamics*, 42(9): 2655–2674. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1885-7>.
- Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., René, P., Berthier, E., Rico, I., Morteno, A., Serrano, E., Serreta, A., López-Moreno, J.I., 2021. Toward an ice-free mountain range: Demise of Pyrenean glaciers during 2011-2020. *Geophysical Research Letters*, 48: e2021GL094339. <https://doi.org/10.1029/2021GL094339>.
- Zabaleta A., Llasat M.C., Antigüedad, I., Lambán J., Jódar, J., Caballero, Y., Beguería S., 2022. Cambios recientes en caudales, niveles de aguas subterráneas e inundaciones en los Pirineos. En: Beguería S., ed., *Caracterización de los recursos hídricos de los Pirineos en la actualidad, y escenarios futuros*. Memorias científicas del proyecto PIRAGUA, vol. 1
- Zglobicki, W., Poesen, J., Cohen, M., Del Monte, M., García-Ruiz, J.M., Ionita, I., Niacsu, L., Machová, Z., Martín-Duque, J.F., Nadal-Romero, E., Pica, A., Rey, F., Solé-Benet, A., Satankoviansky, M., Stolz, C., Torri, D., Soms, J., Vergari, F., 2019. The potential of permanent gullies in Europe as geomorphosites. *Geoheritage*, 11: 217–239. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0252-1>.